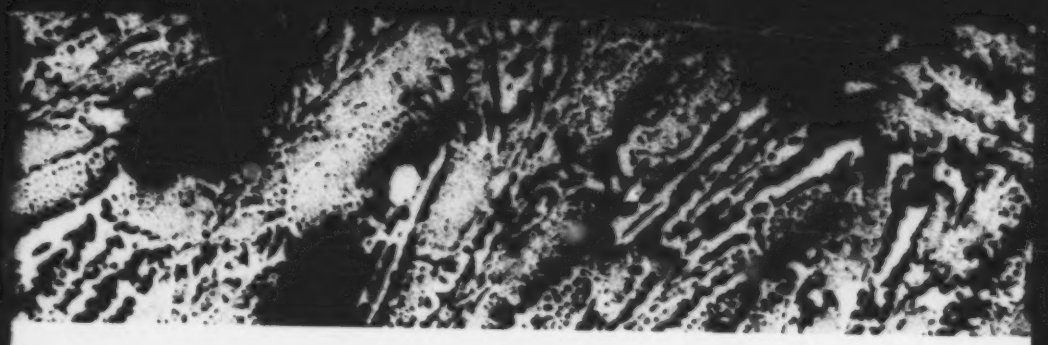
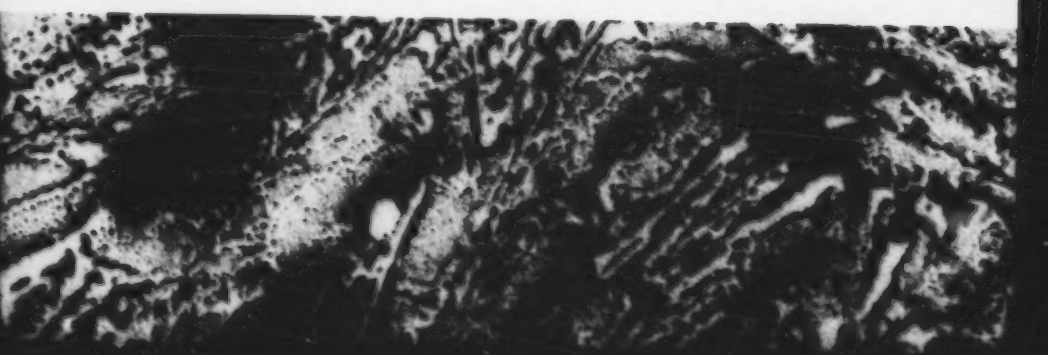


Fontes provenant des Forges du Saint-Maurice, Québec: étude métallurgique

Henry Unglik

Environnement Canada
Service des parcs

Environment Canada
Parks Service



Fontes provenant des Forges du Saint-Maurice, Québec: étude métallurgique

Henry Unglik

Traduction

Études en archéologie
architecture et histoire

Lieux historiques nationaux
Service des parcs
Environnement Canada

91-01071/

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1990.

En vente au Canada par l'entremise de nos agents libraires agréés et autres librairies, ou par la poste au Centre d'édition du gouvernement du Canada, Approvisionnements et Services Canada, Hull, Québec, Canada K1A 0S9.

Publié avec l'autorisation
du ministre de l'Environnement,
Ottawa, 1990.

Traduction : Secrétariat d'État
Révision : Suzanne Adam-Filion
Conception : Jean Brathwaite
Mise en pages électronique : Suzanne Rochette et Lucie Forget
Production de la couverture : Rod Won

Le Service des parcs, Environnement Canada, publie les résultats de ses recherches en archéologie, architecture et histoire. Pour obtenir la liste de nos publications, prière de s'adresser au chef des publications de recherches, Service des parcs, Environnement Canada, 1600 Liverpool Court, Ottawa, K1A 0H3.

Données de catalogage avant publication (Canada)

Unglik, Henry

Fontes provenant des Forges du Saint-Maurice, Québec : étude métallurgique

(Études en archéologie, architecture et histoire,
ISSN 0821-1035)
Publ. aussi en anglais sous le titre : Cast irons from les Forges du Saint-Maurice, Quebec : a metallurgical study
Comprend une références bibliogr.
ISBN 0-660-92968-6
N° de cat. MAS R61-2/9-48F

1. Forges du Saint-Maurice (Québec) — Antiquités. 2. Usines sidérurgiques — Québec (Province) — Mauricie — Histoire. 3. Fonte — Analyse. I. Service canadien des parcs. Lieux et parcs historiques nationaux. II. Titre. III. Coll.

FC2945.SA3914 1990 672.09714'451 C90-098637-9
F1054.S33U5314 1990

Table des matières

5 Résumé

7 Remerciements

9 Introduction

11 Historique

17 Examen métallurgique des fontes
20 Procédés d'examen
23 Analyse chimique
23 Dureté
24 Macrostructure
25 Microstructure
25 Fontes grises
30 Fontes truitées
32 Fontes blanches
33 Caractérisation des fontes
33 Effet de la composition
35 Propriétés mécaniques et comportement en fonderie
41 Méthode de fabrication

47 Progrès technologiques réalisés à l'usine sidérurgique

49 Glossaire de termes métallurgiques

57 Bibliographie

Résumé

Douze produits oeuvrés trouvés lors des fouilles effectuées aux premières installations sidérurgiques du Canada, les Forges du Saint-Maurice, ont été soumis à l'examen métallurgique. L'examen a établi qu'il s'agissait de fontes se caractérisant par une grande variété de structures typiques des fontes grises, blanches et truitées.

La structure des fontes grises est celle d'une fonte phosphoreuse comportant du graphite lamellaire dans une matrice de perlite. La dureté et la résistance mécanique de ces fontes se comparent à celles des fontes grises modernes. Leur fluidité est excellente, et elles manifestent un degré nul ou très faible de retrait par solidification. Leur composition concorde avec la gamme des normes techniques actuelles pour ce qui est de leur utilisation à des températures élevées, en particulier en ce qui concerne la résistance aux chocs. Les fontes blanches lédeburitiques et les fontes truitées perlitiques contenant de la cémentite massive et de l'eutectique phosphuré sont très dures et fragiles, et elles affichent un retrait considérable.

Les fontes des Forges du Saint-Maurice ont une composition plutôt eutectique et une température du liquidus variant entre 1050 et 1150 °C. La plupart furent produites à partir de minerais de fer riches en phosphore dans un haut fourneau à charbon de bois qui devait fonctionner à des températures peu élevées. Il s'agit de fers au bois, fabriqués dans des fours à vent froid.

On a constaté que ces objets de fonte ont une teneur en carbone plus élevée ainsi qu'une teneur en manganèse et en phosphore généralement supérieure à celles des fontes américaines ou européennes. Le taux de silicium est semblable tandis que celui du soufre est faible, comme il est de coutume pour les fers au bois. Le fer en fusion était probablement amené de l'avant-creuset ouvert du haut fourneau dans une poche de coulée, d'où il était versé dans des moules préparés sur le plancher de la halle de coulée. Les fontes grises étaient coulées à une température proche du point de fusion, voisine de 1200 °C, fort probablement dans des moules de

sable ou d'argile. Les fontes blanches étaient coulées à un température plus élevée, et probablement versées dans des coquilles.

Les différences de structure, de composition et de technique sont en fait liées aux quatre périodes distinctes d'occupation des Forges : I, 1667-1760; II, 1760-1800; III, 1800-1850; et IV, 1850-1883. Les fontes provenant de la période I possèdent une structure variable. À part une exception, les fontes appartenant aux périodes II et III sont blanches ou truitées, la plupart ayant une très forte teneur en carbone total. Pendant ces deux périodes, une forte proportion de charbon de bois était utilisée comme combustible au cours de la fusion dans le haut fourneau. Au cours des périodes I ou II, le type de minerai utilisé pour fabriquer les fontes changea, passant d'une teneur faible à une forte teneur en phosphore. Durant la transition entre les périodes III et IV, la technique de moulage se modifia, les coquilles étant remplacées par des moules de sable. La dernière période se caractérise par ses plaques de fonte grise phosphoreuse présentant une structure et une composition uniformes.

Soumis en vue de la publication en 1987 par Henry Unglik, Direction de la conservation des ressources historiques, Service des parcs, Environnement Canada, Ottawa.

Remerciements

Je souhaite exprimer ma reconnaissance à J. Stewart, à J. Moore et à M. Salmon de la Direction de la conservation des ressources historiques, Service canadien des parcs, Ottawa, pour les nombreux commentaires précieux qu'ils ont émis par suite de leur lecture du manuscrit. Je dois aussi maints remerciements à André Bérubé, Histoire et archéologie, Service canadien des parcs, région du Québec, qui a gracieusement accepté de revoir la partie historique du document. Je tiens à remercier tout spécialement mes collègues J. Stewart, C. Costain et A. Douglas pour leur analyse chimique des fontes, G. Vandervlugt pour sa contribution à la réalisation d'un jeu de photographies, Carol Piper pour son travail en rapport avec la figure 1, et le Service canadien des parcs pour son soutien constant.

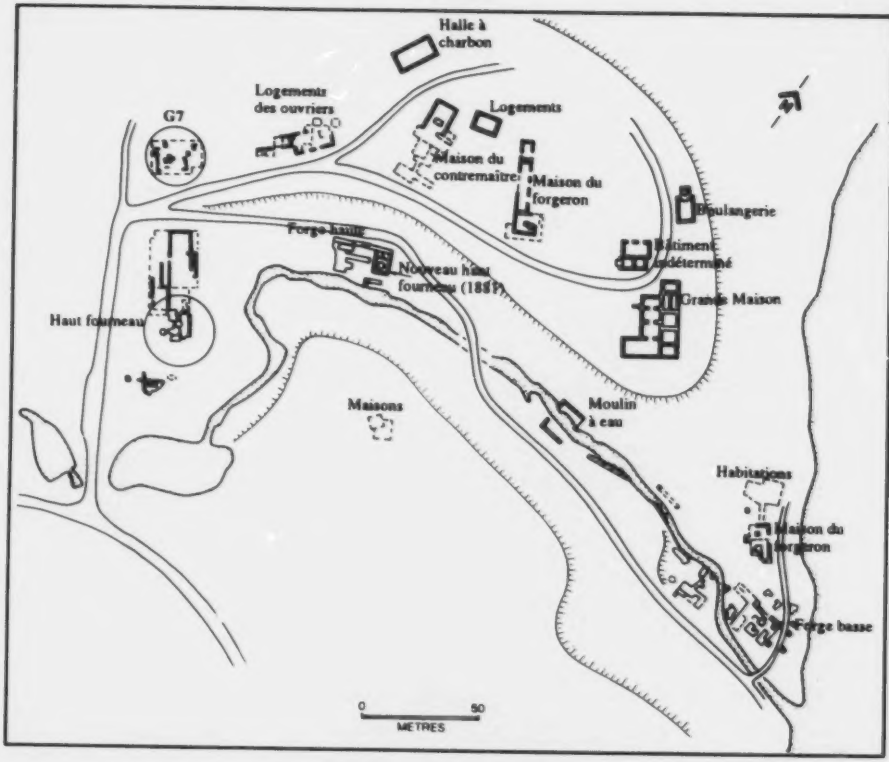
Introduction

Dans le présent document, on traite de l'étude métallurgique qui fut réalisée sur douze fontes provenant des Forges du Saint-Maurice, les premières installations sidérurgiques du Canada.

Ce site sidérurgique des XVIII^{e} et XIX^{e} siècles est situé près de Trois-Rivières, et il a fait l'objet de fouilles importantes par le Service canadien des parcs au cours des dix dernières années. On a trouvé ces fontes dans une zone domestique se trouvant au nord du haut fourneau (voir fig. 1) et employé une chronologie relative tenant compte des quatre différentes périodes d'occupation.

En même temps qu'un court historique du site, on présente un exposé de la macrostructure, de la microstructure, de la dureté ainsi qu'une analyse chimique des fontes grises, truitées et blanches. On a employé les résultats pour caractériser chaque produit, sa composition, sa structure, son comportement en fonderie et ses propriétés mécaniques. On examine la méthode de fabrication des fontes, et les progrès technologiques réalisés dans cette usine sidérurgique. Des comparaisons sont établies entre les fontes provenant des Forges et celles provenant d'autres centres sidérurgiques.

Cet ouvrage a paru en anglais en version abrégée dans le *Journal of the Historical Metallurgy Society* (Unglik 1987).



1 Fouilles aux installations sidérurgiques des Forges du Saint-Maurice. Les objets de fonte dont il est question dans le présent rapport ont été trouvés dans le secteur G7, une zone domestique se trouvant au nord du haut fourneau.

Historique

Les données relatives aux Forges du Saint-Maurice sont tirées de deux sources principales : les documents historiques (Swank s.d.; Harrington 1874; Bérubé 1983, 1984 [comm. pers.]; Miller 1968; Trottier 1980; Beaudet 1983) et les fouilles entreprises sur le site par le Service canadien des parcs (Cox 1977; McGain 1977; Nadon 1977).

Les Forges du Saint-Maurice furent fondées sur les berges de la rivière Saint-Maurice près de Trois-Rivières. Du fer fut découvert à proximité de Trois-Rivières dès 1667 et l'extraction du minerai commença en 1672. L'usine sidérurgique fut officiellement établie en 1730, année où Louis XV accorda un mandat royal à un résidant de la Nouvelle-France, François Poulin de Francheville, marchand montréalais et propriétaire de la seigneurie du Saint-Maurice. De courte durée, la première initiative en vue d'extraire le fer directement à partir du minerai fut tentée dans une forge à la catalane construite en 1733. En employant une technique de procédé direct similaire à celle qui était en vigueur en Nouvelle-Angleterre, la forge catalane de Francheville produisit au cours de toute sa période d'activité en 1734 une tonne de barres en fer forgé. Sa production restreinte dépassait à peine neuf kilogrammes de fer par jour.

En 1735, une nouvelle entreprise, Cugnet et Cie, fut constituée; elle visait la rentabilité en misant sur l'emploi d'un procédé de réduction indirect. Le maître de l'usine sidérurgique, Olivier de Vézin, arriva bientôt de France pour assurer la direction des Forges. On entreprit la construction d'un haut fourneau d'une capacité de production de 2,5 tonnes de fonte brute en 1736. Cette même année, la construction de la Grande Maison, de la forge basse et des logements des ouvriers fut commencée (fig. 1). La fusion du minerai de fer de type limonite dans le haut fourneau alimenté au charbon de bois était devenue chose courante dès 1738. Deux fours d'affinage furent érigés en 1736 à la forge basse, et deux autres en 1739 dans une deuxième forge (le haut fourneau). En 1740, le haut fourneau at-

teignait une hauteur de 4,5 mètres. Une roue hydraulique actionnait des soufflets en bois, alimentés en air froid par une tuyère. Toutes les matières premières nécessaires à la fabrication du fer, — c.-à-d. la limonite pure, le charbon en quantité et le calcaire de qualité — se trouvaient à proximité. On employait du charbon fabriqué avec du bois de feuillus pour alimenter le haut fourneau et du charbon fabriqué avec du bois de conifères pour alimenter les forges. Le fer était produit sous forme de pièces coulées obtenues en versant directement le fer en fusion du haut fourneau dans des moules préparés. Ces pièces coulées étaient des pots, des chaudrons et d'autres articles creux, des étuves, et du matériel militaire tel que des canons, des mortiers et des boulets de canon. Dans la forge à martelage, on fabriquait divers types de barres en fer forgé. En 1742, les Forges disposaient d'une main-d'oeuvre permanente d'environ 30 hommes à laquelle venaient s'ajouter environ 240 travailleurs saisonniers. Cugnet et Cie fit faillite en 1741, et la propriété des Forges revint à la Couronne en 1743.

En 1760, le Canada passa aux mains des Britanniques, tout comme les Forges du Saint-Maurice. La production cessa complètement en 1765 par suite de cinq années d'activités réduites; elle reprit avec succès entre 1767 et 1793. En 1793, Matthew Bell devint l'un des titulaires du domaine des Forges, qui prospérèrent pour la majeure partie des 53 années durant lesquelles il en assuma la direction. En 1815, la main-d'oeuvre totale s'élevait à environ 300 hommes, y compris 50 travailleurs spécialisés vivant dans la communauté avoisinante, et le taux de production augmenta substantiellement. On produisait en grande quantité des foyers de cuisine, de grosses chaudières destinées à l'industrie de la potasse, des machines industrielles et des socs de charrue. Dans les années 1820, un cubilot ou un four à air fut installé dans le secteur du haut fourneau. À ce moment-là, seulement une partie de la fonte brute était encore exportée.

En 1846, le gouvernement britannique vendit l'usine sidérurgique à Henry Stuart. Suivit une période de changements techniques, comportant principalement la modernisation du haut fourneau dont on augmenta les dimensions et que l'on dota de tuyères à refroidissement à l'eau, d'une étuve à vent chaud et d'un compresseur d'air actionné par une turbine. On doubla la production quotidienne du haut fourneau, qui dépassa les quatre tonnes, dont dix pour cent se composait de fontes blanches et dix pour cent de fontes truitées. Il fallait trois tonnes de minerai et une tonne de charbon de bois pour produire une tonne de fer.

Les Forges commencèrent à péricliter approximativement une décennie avant qu'elles ne soient achetées par John McDougall en 1863. On délais-

sa la production de pièces coulées en fer. Très peu de fer forgé était raffiné dans le foyer wallon, et ce fer forgé était en grande partie utilisé par le forgeron pour un usage local. Après l'arrêt de la production du fer forgé à la fin des années 1860, la fonte demeura le seul produit des Forges. Ce métal de haute qualité était acheminé vers les grandes fonderies de Montréal où il servait à fabriquer des roues de wagons. Le haut fourneau atteignait une hauteur approximative de neuf mètres en 1873, et son diamètre interne était de 0,75 mètre au foyer, de deux mètres aux étalages et d'un mètre au niveau de la plate-forme du gueulard. Il était alimenté en air froid par deux tuyères. En raison de la dépression économique, l'usine ferma ses portes en 1877, puis les ouvrait de nouveau en 1880. La construction d'un haut fourneau moderne l'année suivante ne ranima pas l'entreprise industrielle.

Le haut fourneau originel fut finalement délaissé en 1883, et l'usine sidérurgique dut cesser ses activités en raison d'une hausse des coûts des matières premières, de la concurrence au sein de ce secteur industriel et des graves problèmes financiers du successeur de John McDougall, George McDougall. Swank affirme dans un écrit datant de 1892 (s.d. : 351) et portant sur « la première usine sidérurgique du Canada » : « au moment où on l'abandonna en 1883, le haut fourneau du Saint-Maurice était le plus ancien exploité sur le continent américain ».

Un rapport peut être établi entre les quatre périodes archéologiques des Forges et les trois périodes de l'histoire politique du Canada — la période de la Nouvelle-France (1604-1760), celle de l'Amérique du Nord britannique (1763-1867) et celle des premières années de la Confédération (après 1867). Ci-dessous les grandes lignes du développement technologique de l'usine sidérurgique.

I 1667-1760

1667	Découverte de minerai de fer à proximité de Trois-Rivières.
1672	Début de l'extraction du minerai.
1730	Fondation des Forges par mandat royal.
1732-1734	Adoption du procédé direct employé en Nouvelle-Angleterre. Production quotidienne de fer dans la forge à la catalane dépassant légèrement neuf kilogrammes. Production totale d'une tonne de fer forgé.
1736	Construction d'un haut fourneau et de deux fours d'affinage (la forge basse).

	1738-1760	Emploi du procédé indirect dans un haut fourneau au charbon de bois flanqué de deux grandes forges. (Haute forge construite en 1739.) Production quotidienne de 2,5 tonnes de fonte. Période d'exploitation des Forges parmi les plus prospères. Production de pots, de chaudrons, de poêles, de canons, de mortiers et de barres de fer forgé.
II	**1760-1800**	
	1760-1793	Activités intermittentes.
III	**1800-1850**	
	1793-1846	Grande prospérité au cours de la première partie et performance à la baisse au cours de la deuxième partie de cette période.
	1793-1815	Production de grandes chaudières à potasse, de poêles de chauffage, de socs à charrues, de chaudrons, de machines industrielles, d'enclumes, d'outils, de divers genres de pièces coulées, des barres en fer forgé et une quantité de fonte brute.
	1820-1830	Introduction du cubilot ou four à air; seulement une petite quantité de fonte brute était destinée à l'exportation.
IV	**1850-1883**	
	1846-1883	Dernières années — une période de changements technologiques, mais d'activités intermittentes. La production quotidienne progressa jusqu'à quatre ou cinq tonnes après la rénovation du haut fourneau, dont on augmenta les dimensions. Une étuve à vent chaud et un compresseur d'air vinrent s'ajouter au haut fourneau.
	1860-1870	La production de fer forgé ainsi que de pièces coulées en fer cessa complètement.
	1873-1883	Les activités intermittentes se réduisirent à la production de fonte acheminée vers les fonderies de Montréal spécialisées dans la fabrication de wagons.

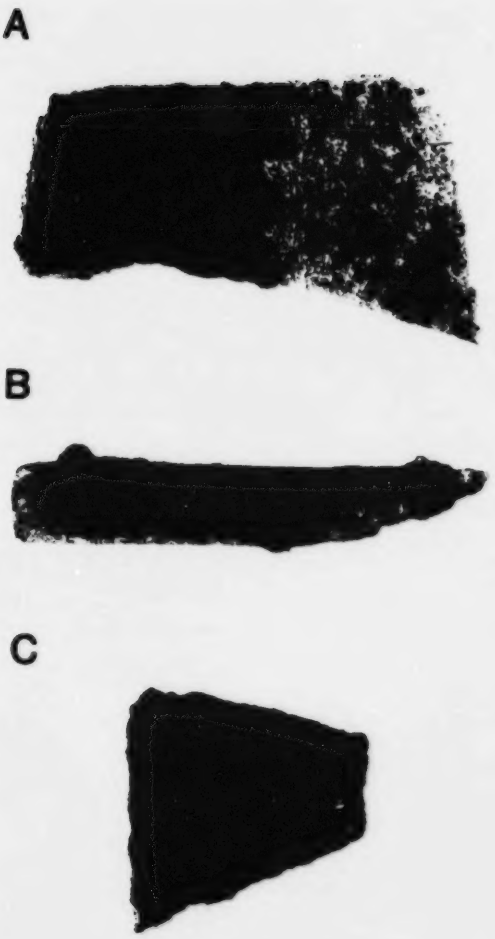
1881	Construction d'un deuxième haut fourneau alimenté au charbon de bois. De conception moderne, il était doté d'une soufflerie à air chaud et de trois tuyères à refroidissement à l'eau.
1883	Abandon du haut fourneau originel. Fermeture définitive de l'usine sidérurgique.

Examen métallurgique des fontes

Les surfaces des fontes provenant des Forges étaient couvertes d'une couche de sable fortement adhérente sous laquelle on pouvait voir du métal corrodé par des produits de corrosion compacts de couleur brun sombre. La désignation, la taille et la chronologie de ces objets figurent dans le tableau 1.

Tableau 1
Description des objets fabriqués en fonte

Période archéologique	N° de provenance	N° de code	Objet	Dimension approx. (cm)	Épaisseur (cm)
I	25G7A40	C1	plaque	23 x 16	1,5
1667–1760	25G7E9	C2	descente de coulée	7 x 8	1,5
	25G7E9	C3	fragments de ferraille	6 x 4,5	0,6
II	25G7C15	C4	descente de coulée	5,5 x 7	1,5
1760–1800	25G7B47	C5	rigole	18 x 6	1,2
	25G7E8	C6	descente de coulée	5,5 x 5,5	3,0
III	25G7B30	C7	descente de coulée	9 x 10	2,0
1800–1850	25G7C8	C8	rigole	17,5 x 3	1,5
	25G7F5	C9	descente de coulée	8 x 11	2,0
IV	25G7B4	C10	plaque	10 x 4,5	1,0
1850–1883	25G7B23	C11	plaque	12 x 10	0,8
	25G7B5	C12	plaque	9 x 5	0,8



2 Vue d'ensemble d'objets choisis en fonte, à X 0,5: *A*, plaque de fonte grise; *B*, rigole en fonte truitée; *C*, descente de coulée en fonte blanche.

3 *En regard.* Anisotropie opticale de lamelles de graphite sous lumière polarisée: *A*, lumière polarisée dans un plan; *B*, en position de 90°; *C*, avec nicols croisés.

A
B
C

Procédés d'examen

Les procédés d'examen ont été les suivants : l'observation visuelle, l'examen macroscopique, les essais de dureté, l'analyse chimique, l'examen microscopique et les mesures de microdureté. Les objets de fonte furent sectionnés au moyen d'une pointe de diamant dans une direction parallèle au plus grand axe d'écoulement du métal (l'aspect général d'objets choisis, découverts lors des fouilles, est présenté dans la figure 2).

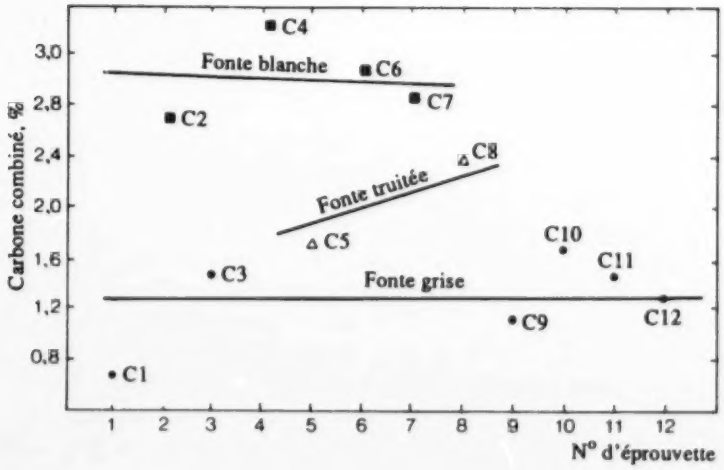
On a attaqué, à l'échelle macroscopique, au persulfate d'ammonium à 10 pour cent toutes les coupes d'échantillons afin de mettre en évidence les anomalies de fonderie ainsi que la ségrégation de cristaux et la structure de vastes zones. On a attaqué au réactif de Stead les fontes grises en vue de faire ressortir les cellules eutectiques, structures cellulaires dont le développement est lié à la transformation de l'eutectique austénite/graphite. Les fractures superficielles et les sections attaquées furent examinées tant à l'oeil nu qu'à faible grossissement avec un microscope stéréoscopique.

On a effectué des essais de dureté sur des coupes attaquées à l'acide en ayant recours à la méthode de Rockwell. Les mesures de dureté Rockwell à l'échelle B (une boule d'un diamètre de 1/16 pouce sous une charge de 100 kilogrammes) furent utilisées pour les matériaux tendres, et les mesures de dureté Rockwell à l'échelle C (une pointe de diamant sous une charge de 150 kilogrammes) pour les matériaux durs. On a converti les valeurs obtenues en indices Brinell HB 10/3000 en tant que valeurs approximatives de dureté équivalente conformément à la norme E 140 ASTM (American Society for Testing and Materials). Des copeaux prélevés dans des coupes préparées pour un examen macroscopique furent analysés au moyen de méthodes de colorimétrie, d'analyse chimique par voie humide et de spectroscopie par absorption atomique.

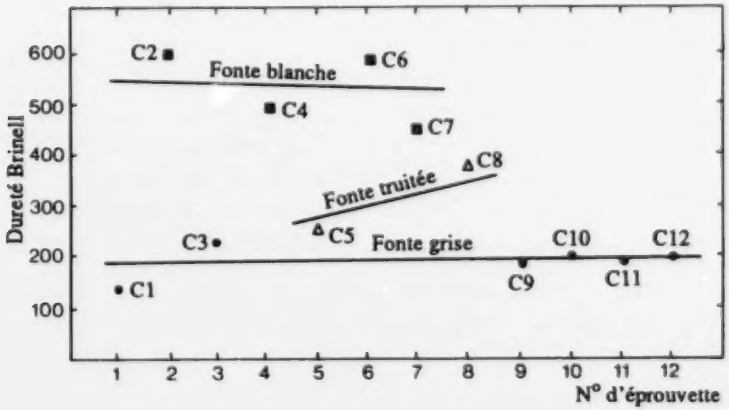
On a employé un éclairage en lumière polarisée et des effets de pléochroïsme par réflexion (Morrogh 1941a :199f) pour déterminer si les lamelles de graphite avaient été correctement polies. Examinées à la lumière ordinaire, les lamelles de graphite paraissaient de couleur uniforme gris brunâtre. À la lumière polarisée dans un plan, certaines lamelles paraissaient claires, d'autres sombres et d'autres de teinte intermédiaire (fig. 3*A*); en faisant tourner l'échantillon de 90°, les lamelles auparavant sombres parurent claires et inversement pour les claires (fig. 3*B*). Avec les nicols croisés, les lamelles de graphite présentes dans le même champ sont apparues en position d'illumination (fig. 3*C*). Des lamelles de graphite insuffisamment polies ne donneraient pas les caractéristiques de polarisation requises.

Tableau 2
Analyse chimique des fontes

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Carbone total	3,45	3,91	3,91	3,95	4,18	4,51	4,21	3,81	3,77	3,79	3,71	3,88
Carbone graphitique	3,18	1,60	2,83	0,89	2,87	1,81	1,60	1,80	3,03	2,53	2,63	3,01
Carbone combiné	0,27	2,31	1,08	3,06	1,31	2,70	2,61	2,01	0,74	1,26	1,08	0,87
Silicium	0,46	0,65	0,78	0,67	0,49	0,48	0,44	0,67	0,70	0,84	0,77	0,44
Manganèse	0,46	0,65	0,94	0,13	1,42	0,90	1,38	1,46	0,91	0,12	0,11	1,00
Phosphore	0,19	0,28	0,11	0,57	0,85	0,20	1,31	1,25	0,63	0,70	0,66	0,70
Soufre	0,029	0,025	0,027	0,035	0,034	0,039	0,031	0,020	0,034	0,032	0,040	0,051
Chrome	0,003	0,003	0,005	0,007	0,006	0,007	0,007	0,005	0,006	0,004	0,004	0,005
Nickel	0,004	0,007	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004	0,003	0,002	0,004
Cuivre	0,001	0,004	0,002	0,004	0,002	0,003	0,004	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001
Titane	0,02	0,03	—	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,06	0,03	0,02	0,02



4 Groupements des fontes en fonction de la teneur en carbone combiné. Les cercles représentent les fontes grises; les triangles, les fontes truitées; et les carrés, les fontes blanches.



5 Groupements des fontes en fonction de la dureté.

Les micro-échantillons ont été attaqués à l'acide au nital à 4 pour cent pour mettre en évidence la structure des fontes, et au réactif de Murakami pour permettre de distinguer le phosphure de fer de la cémentite. La microstructure des sections polies et attaquées à l'acide fut étudiée par microscopie par réflexion (Leitz « Orthoplan ») à un grossissement de 100, 500 et 1000 diamètres.

La forme, la dimension et la distribution des lamelles de graphite furent déterminées à un grossissement de 100 diamètres en conformité avec la norme A 247 de l'ASTM. La dureté relative des microconstituants fut mesurée au moyen d'un instrument pour essai de microdureté Vickers (Leitz « Miniload ») avec pénétrateur à pointe de diamant.

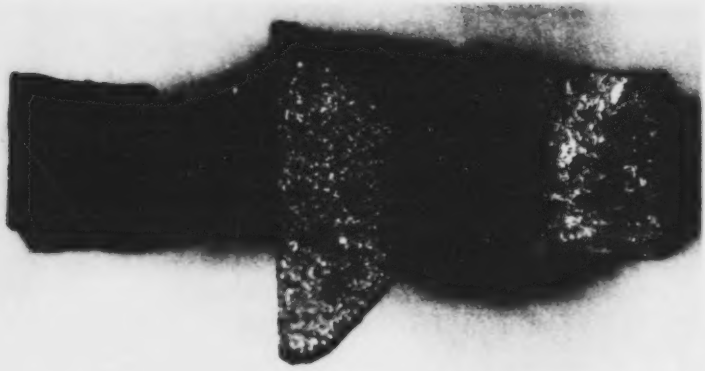
Analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique (tableau 2) indiquent que, mises à part quelques exceptions, la teneur en carbone est plus élevée et la teneur en silicium est considérablement inférieure à celle que l'on trouve habituellement dans la fonte moderne (cf. tableau 5). La teneur en phosphore est souvent supérieure à la gamme actuelle, tandis que la teneur en soufre est inférieure à celle que l'on trouve de nos jours. On note une grande variabilité du taux de manganèse, généralement élevé, ainsi que du phosphore, bien qu'à un moindre degré. Les autres éléments (Cr, Ni, Cu et Ti) n'apparaissent qu'en traces.

L'analyse chimique indique, en outre, que le carbone présent dans les fontes est partiellement graphitique et partiellement combiné à la fonte. Les distinctions physiques nettement marquées entre les trois types de fontes (grise, blanche et truitée) sont fonction de la quantité de carbone combiné présente dans le fer, et cette quantité est à son tour influencée par la vitesse de refroidissement et la microstructure primaire. La figure 4 et le tableau 4 montrent que les objets de fonte font partie des catégories fonte grise, fonte truitée et fonte blanche.

Dureté

Les résultats des essais de dureté sont présentés dans le tableau 3. Il n'est pas étonnant que la détermination des chiffres de dureté de chacun des objets (fig. 5) débouche sur des groupements de fontes analogues à ceux qui sont constitués en fonction de la teneur en carbone combiné. Les chiffres



6 Fractures superficielles (gauche à droite) de fontes grises, truitées et blanches à X 2.

de dureté des objets appartenant à chaque groupe (tableau 4) correspondent aux chiffres de dureté typiques des fontes grises (130-250 HB), des fontes truitées (250-450 HB) et des fontes blanches (450-600 HB). La dureté de tous les objets de fonte grise (à l'exception de C1) s'apparente à celle des fontes grises perlitiques du commerce. L'échantillon C1 affiche le chiffre de dureté le plus bas (140 HB), chiffre typique des fontes grises ferritiques soumises au recuit.

Macrostructure

La figure 6 montre l'aspect des fractures superficielles des fontes grises, truitées et blanches. Les trois types de fontes présentent habituellement des fractures fragiles, ne laissant voir aucun ou qu'un mince indice de déformation plastique. On peut constater dans la figure 6 que la surface fracturée de l'échantillon de fonte grise présente la couleur grise caractéristique, tandis que celle de l'échantillon de fonte blanche paraît blanc cristallin. La surface de fracturation de l'échantillon de fonte truitée se situe à mi-chemin entre celle des échantillons de fonte grise et celle des échantillons de fonte blanche.

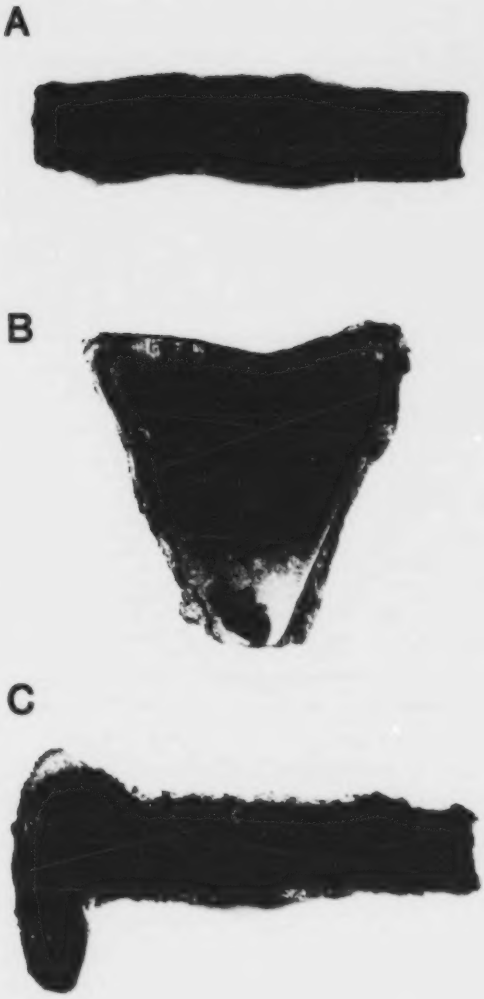
La macrostructure des fontes grises se caractérise par une surface grise ou sombre sans défauts apparents (fig. 7A) et par un fin réseau de cellules eutectiques de phosphore (fig. 8A). Le réactif de Stead a assombri sélectivement les régions pauvres en phosphore et laissé les régions riches en phosphore intactes et de couleur claire. On observe dans les fontes truitées la présence d'une porosité de retassure (fig. 7B) et une surface brillante de cémentite massive comportant une vaste proportion de zones sombres, c.-à-d. de nombreuses taches grises de concentration graphitique (fig. 8B).

Dans les fontes blanches, la présence d'anomalies de fonderie telles que des retassures, des fissures ou pores interdendritiques est encore plus répandue que dans les fontes truitées (fig. 7C); dans ce dernier cas, la surface brillante de cémentite massive comporte seulement quelques taches grises (fig. 8C). Les cristaux columnaires, qui sont orientés vers le centre de la pièce coulée, se sont étendus perpendiculairement à la face du moule. Il était facile d'observer la présence de plans de moindre résistance aux points de rencontre des cristaux.

Microstructure

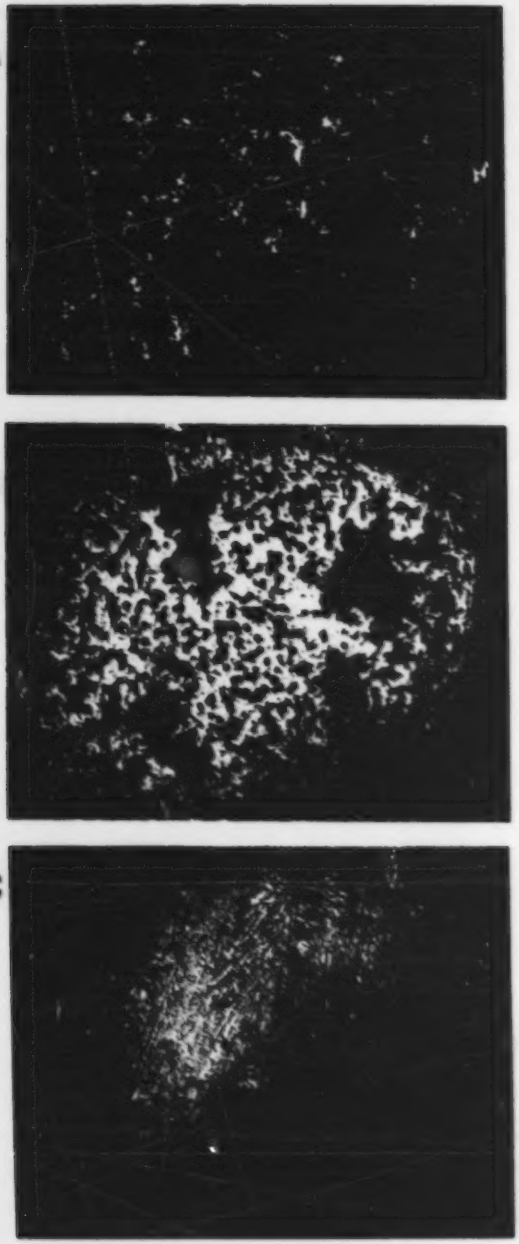
Il est ressorti de l'examen microscopique que six objets (C1, C3, C9, C10, C11 et C12) possèdent une structure caractéristique de la fonte grise; quatre (C2, C4, C6 et C7), de la fonte blanche; et les deux autres (C5 et C8), de la fonte truitée.

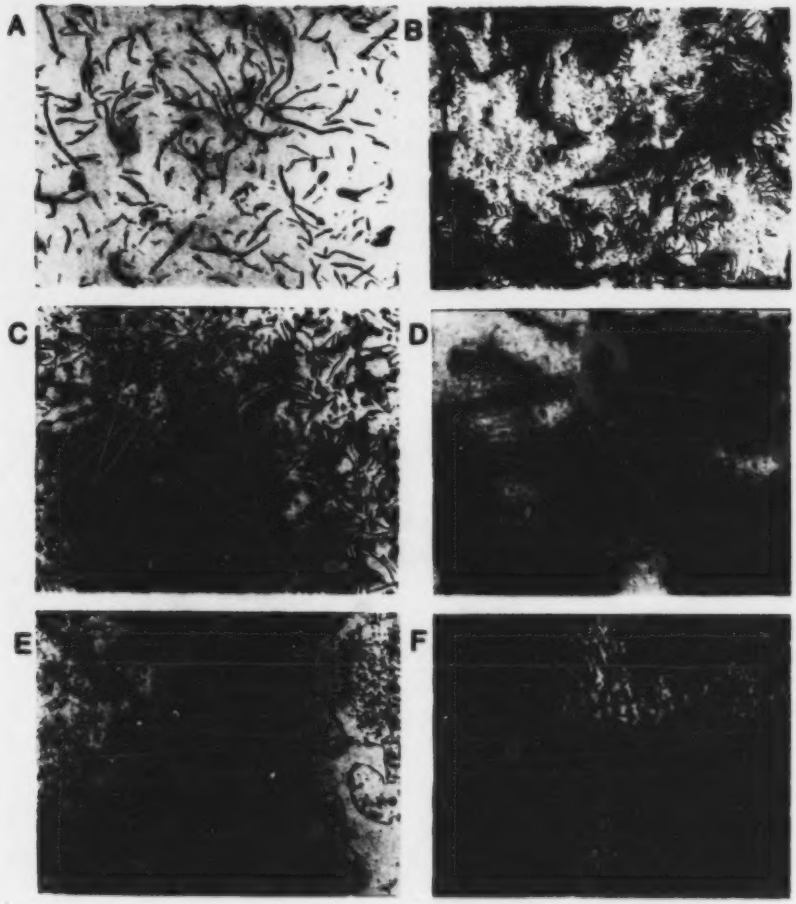
Les fontes grises. La structure des échantillons de fonte grise est celle d'une fonte phosphoreuse hypoeutectique comportant du graphite lamellaire dans une matrice perlitique. Tel qu'on peut le voir dans la figure 9A, le graphite se présente sous forme de lamelles d'une longueur considérable, d'orientation aléatoire avec quelques-unes disposées en rosettes. Dans tous les objets de fonte grise, à l'exception de C1, la perlite relativement dure (385 HV50) consiste en des lamelles alternées, fines et grossières, de ferrite claire et de cémentite plus sombre (fig. 9B). La meilleure résistance mécanique dans la gamme ordinaire des fontes grises est associée à la présence d'une matrice de perlite. La matrice perlitique des échantillons rehausse la qualité des plaques de fonte grise, ce qui contribue à leur conférer une plus grande dureté, à augmenter leur résistance mécanique et leur résistance à l'usure. La présence de cémentite libre dans l'échantillon C3 explique son chiffre de dureté quelque peu supérieur (228 HB).



7 Macrostructure de fontes attaquées au persulfate d'ammonium: *A*, fonte grise, à X 2; *B*, fonte truitée, à X 1,5; *C*, fonte blanche, à X 1,5.

8 *En regard*. Macrostructure de fontes attaquées au réactif de Stead: *A*, fonte grise, à X 1,5; *B*, fonte truitée, à X 8; *C*, fonte blanche, à X 8.


A
B
C



9 Microstructure des fontes grises: *A*, non attaquées, à X 100; *B*, nital à 4 %, à X 500; *C*, réactif de Muramakami, à X 100; *D*, réactif de Murakami, à X 1000; *E* et *F*, nital à 4 %, à X 100.

L'échantillon C1, une plaque, contient outre des régions de perlite lamellaire, de grandes zones relativement tendres de perlite sphéroïdale (204 HV_{50}) comportant des particules globulaires de carbure uniformément dispersées dans toute la matrice ferritique (fig. 9*E*). Les carbures sphéroïdisés se formèrent en raison d'une exposition prolongée à la température critique (723 °C), suivie d'un refroidissement lent et continu. Par conséquent, le chiffre de dureté du matériau baissa fortement (jusqu'à 140 HB). La présence dans la structure de perlite lamellaire et sphéroïdale indique que, durant le chauffage, la plaque C1 a été soumise à une température inégale.

L'eutectique phosphuré, avec sa forme lenticulaire caractéristique, représente un autre constituant important des fontes grises. L'attaque sélective au réactif de Murakami assombrit la phase de phosphure présente dans les régions interdendritiques, qui furent les dernières à se solidifier (fig. 9*C*). En raison de la teneur élevée en phosphore, la phase phosphurée était assez abondante pour que se constitue un fin réseau discontinu, qui suit les limites de la cellule eutectique d'austénite/graphite. La nature ternaire de l'eutectique phosphuré est mise en évidence à fort grossissement dans la figure 9*D*. On observe que ce composé intermétallique dur et fragile, appelé stéadite (963 HV_{50}), se compose en fait de ferrite (ou perlite) dans une matrice faite d'un mélange de phosphure de fer et de carbure de fer. La présence d'une grande quantité de stéadite en formation avancée de réseau augmente la dureté, la fragilité et la résistance à l'usure.

La fine structure cellulaire qui apparaît très nettement dans ces fontes grises riches en phosphore correspond à leur mode de solidification et se rapproche de la granulométrie du fer forgé ou de l'acier monophase. Il a été démontré que la maille avait une influence importante sur les propriétés mécaniques, ainsi que que sur les caractéristiques de retrait du fer (Bailey et Samuels 1971 : 126, 128, 133). La résistance à la traction augmente à mesure que diminue la dimension de maille. En même temps, l'existence de défauts de porosité est aggravée par l'accroissement du nombre de cellules eutectiques, bien qu'on n'a décelé aucune porosité dans les coupes macroscopiques de fonte grise, à l'exception de l'échantillon C9.

En plus des phases principales, on a remarqué la présence d'une zone de trempe primaire à la surface des plaques C1, C3 et C12, de la cémentite libre sur les plaques C1 et C3, et de nombreuses inclusions non métalliques distribuées dans la structure des fontes grises. Le refroidissement a été particulièrement rapide lorsque le métal en fusion s'est trouvé au contact des parois du moule, ce qui a eu pour effet d'orienter favorablement les colonnes de cémentite par rapport à la direction du flux thermique (fig. 9*F*). Les inclusions non métalliques, examinées sous un éclairage à fond clair,

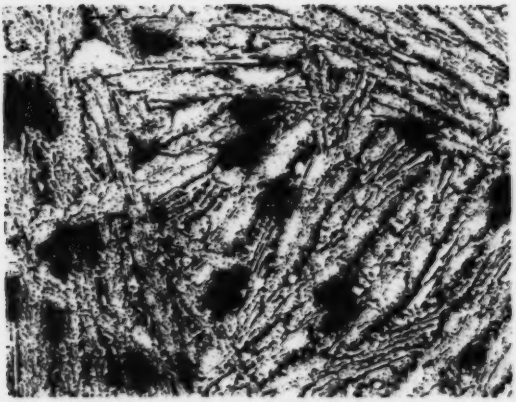
10 Microstructure d'une fonte truitée, nital à 4 %, à X 100.

11 *En regard.* Microstructure de fontes blanches, nital à 4 %: A, X 100; B, X 500; C, X 100

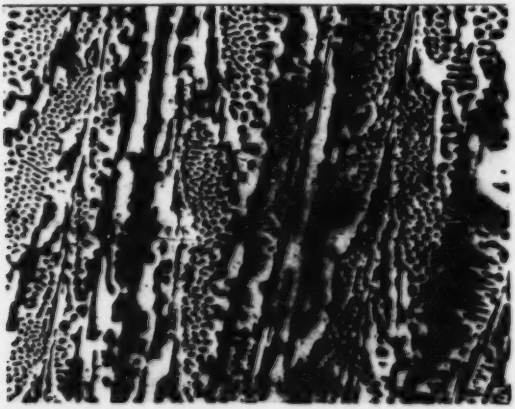
Les inclusions non métalliques, examinées sous un éclairage à fond clair, présentaient une couleur uniforme gris tourterelle (fig. 9A) et, avec les nicols croisés, restèrent sombres quelle que soit la position de la platine. On admet généralement que les inclusions idiomorphes gris tourterelle que l'on trouve dans les fontes se composent de sulfure de manganèse. Cette hypothèse est renforcée par le fait que la plupart des objets de fonte grise contiennent suffisamment de manganèse pour équilibrer la teneur en soufre.

Les fontes truitées. Les fontes truitées comportent du graphite lamellaire, de la cémentite libre et une quantité considérable d'eutectique phosphuré dans une matrice de perlite (fig. 10). Le graphite se présente sous forme de lamelles caractérisées par des groupements en rosettes et une orientation

A



B



C

aléatoire (forme VII, type B, granulométrie 4). La distribution de graphite en rosettes est chose fréquente seulement dans les fontes truitées. En raison du faible taux de germination eutectique, la dimension de la maille était suffisamment grande pour que le développement des lamelles se fasse selon une configuration radiale. La perlite lamellaire des fontes truitées, qui est plus fine que dans le cas des fontes grises, affiche conséquemment des chiffres de microdureté plus élevés (437 HV_{50}). La cémentite libre, une phase très dure et fragile (1121 HV_{50}), se présente sous l'aspect de petits et grands cristaux columnaires d'orientation aléatoire. Le chiffre de dureté nettement supérieur de l'échantillon C8 (378 HB) en comparaison de celui de l'échantillon C5 (261 HB) est clairement attribuable à la concentration plus forte de cémentite libre du premier échantillon. Cette structure transitionnelle résulte de l'exposition des échantillons à des conditions limites — soit une vitesse intermédiaire de refroidissement. Si les échantillons C5 et C8 avaient été coulés dans un moule de section légèrement plus grande, ils se seraient solidifiés pour donner de la fonte grise.

Les fontes blanches. La plupart des fontes blanches se composent d'un mélange dur d'eutectique de cémentite et de perlite, connu sous le nom de lédeburite (913 HV_{50}), et d'une petite quantité de graphite (fig. 11*A*). Les inclusions et aggrégats irréguliers de graphite montrent des signes de détérioration et leur distribution n'est pas uniforme. Ces petites agglomérations de graphite se formèrent en raison de la teneur très élevée en carbone. Leur présence témoigne de la difficulté de stabiliser la cémentite massive en dépit du faible taux de silicium et des taux plutôt élevés de phosphore et de manganèse. À plus fort degré de grossissement, des détails de l'eutectique lédeburitique bien cristallisé sont apparus nettement (fig. 11*B*), laissant voir des cristaux blancs de cémentite ne présentant pas de structures particulières ainsi que la configuration en forme de bâtonnets qu'a pris le constituent austénite transformé en perlite au cours du refroidissement. La structure de C7 (fig. 11*C*) montre un degré élevé de dégénérescence de l'eutectique lédeburitique, prenant la forme de cémentite massive primaire dont l'autre constituant eutectique (perlite) est absent. À la température eutectique, il n'est pas inhabituel que la lédeburite se sépare complètement, l'austénite eutectique s'ajoutant aux dendrites d'austénite primaire,et qu'il subsiste à sa place des colonnes de cémentite libre et massive. Selon Bailey et Samuels (1971 : 129), l'apparente dégénérescence des alliages hypoeutectiques se produit progressivement à mesure que l'on ajoute du phosphore, qui atteint 1,3 pour cent dans l'échantillon C7.

Caractérisation des fontes

Effet de la composition

Les principaux facteurs qui inflencent le type de structure primaire de la fonte, c.-à-d. formation de graphite plutôt que de cémentite durant la solidification de l'eutectique, sont la composition et la vitesse de refroidissement, qui est régie par l'épaisseur du profil, le type de moule et la température du métal coulé. Pour une composition donnée, la vitesse de refroidissement à partir de la température de solidification jusqu'à environ 650 °C détermine le rapport du carbone combiné au carbone graphitique, rapport qui conditionne le type de la fonte produite. La structure de la matrice formée dans un moulage, durant l'intervalle eutectoïde, dépend de la structure primaire et de la vitesse de refroidissement sur toute la gamme de températures eutectoïdes de même que de la composition. Bref, la composition et la vitesse de refroidissement déterminent la structure, les propriétés mécaniques et le comportement en fonderie de la fonte.

La teneur en carbone de l'eutectique, qui se trouve réduite par la présence de silicium et de phosphore, produit un effet des plus significatif sur la solidification des fontes. L'effet de ces trois éléments s'exprime par l'équivalent en carbone et le degré de saturation, qui indiquent tous deux dans quelle mesure la composition de la fonte se rapproche de la composition eutectique. Il s'agit d'un aspect important, car à mesure qu'on se rapproche d'une composition eutectique, le point de fusion diminue, la fluidité augmente et la résistance à la traction de la fonte solidifiée diminue. L'importance métallurgique de l'équivalent en carbone tient également au fait qu'il est révélateur du mode de solidification du fer et, partant, de sa microstructure.

Les valeurs calculées de l'équivalent en carbone et du degré de saturation sont données dans le tableau 3. Une valeur moyenne de l'équivalent en carbone selon laquelle CE = 4,4 et un degré moyen de saturation selon lequel SC = 1,0 indiquent que les fontes possèdent une composition eutectique ou presque; les trois seules fontes fortement hypereutectiques (SC > 1) étant C5, C6 et C7. La présence de graphite mal formé et éclaté s'explique par un taux élevé d'équivalent en carbone dans les fontes blanches. La teneur moyenne en carbone combiné dans les fontes (1 pour cent dans les fontes grises perlitiques, 1,7 pour cent dans les fontes truitées et 2,7 pour cent dans les fontes blanches) illustre par ailleurs à quel point la résistance mécanique et la dureté des fontes dépend nettement de leur microstructure, c.à-d. de la forme adoptée par le carbone total et de la nature de la matrice.

L'effet de la composition ne se limite pas au carbone seul, mais englobe d'autres principaux éléments présents dans les fontes provenant des Forges, tels que le silicium, le manganèse et le soufre. La tendance à la graphitisation du silicium est réduite ici, en raison de la faible teneur en cet élément et de l'influence compensatrice du manganèse. L'influence du soufre doit être considérée du point de vue de sa réaction avec le manganèse. Le manganèse a une plus grande affinité que le fer pour le soufre, et il s'associe au soufre pour former du sulfure de manganèse dans les fontes sous forme de petites intrusions inoffensives, au lieu de sulfure de fer qui pourrait causer une fragilisation sérieuse. La teneur en manganèse était dans la plupart des objets plus que suffisante pour équilibrer la teneur en soufre conformément à la formule % Mn = 1,7 x % S + 0,15 (*Gray and Ductile Iron Castings*... 1971 : 111). Le manganèse présent en excès a peu d'effet sur la solidification, et ne retarde que faiblement la graphitisation primaire; cependant, il stabilise fortement les carbures durant la graphitisation eutectoïde et favorise l'apparition d'une microstructure perlitique. L'équilibrage calculé du manganèse et du soufre permet de retenir la perlite même lorsque les pièces coulées sont refroidies dans des moules en sable. L'excédent de soufre par rapport au soufre combiné avec le manganèse dans les échantillons C4, C10 et C11 est faible, et ne devrait influencer ni la qualité ni les caratéristiques d'utilisation des pièces coulées.

Un autre élément de stabilisation de la perlite est le phosphore. La forte concentration de stéadite dure et fragile qui a été observée dans la structure traduit le haut pourcentage de phosphore révélé par l'analyse chimique. Le phosphore durcit et augmente la résistance de la fonte, mais il augmente aussi de manière appréciable sa fragilité. Il contribue à accroître légèrement la fluidité et la gamme des températures de fusion des fontes, améliorant ainsi leur coulabilité. Les fontes brutes examinées, riches en phosphore,

sont bien adaptées à la fabrication de pièces coulées moyennes ou légères ne nécessitant pas une grande résistance aux chocs. La teneur en phosphore supérieure à la normale améliore la résistance thermique des fontes, c.-à-d. la résistance au gonflement — la conservation des propriétés mécaniques et la résistance à l'écaillage (Bailey et Samuels 1971 : 132f.). La résistance thermique devient importante lorsqu'on emploie des fontes à une température supérieure à 450 °C. Les fontes grises ordinaires à faible teneur en phosphore peuvent supporter des charges soutenues sans subir de distorsions jusqu'à des températures de 300 à 400 °C.

Propriétés mécaniques et comportement en fonderie

Afin de faciliter la caractérisation du matériel des Forges, on a déterminé le comportement en fonderie et plusieurs propriétés mécaniques en fonction de la composition et de l'épaisseur du profil des fontes (tableaux 3, 4). On a établi une corrélation directe entre les propriétés des fontes, énumérées dans le tableau 3, y inclus la température du liquidus, le retrait par solidification et la résistance à la traction, et leur taux d'équivalent en carbone. La température du liquidus des objets en fonte variait entre 1050 et 1150 °C. Dans le cas des fontes grises, elle atteignait la limite supérieure, tandis que dans celui des fontes truitées, elle se situait en position intermédiaire, et que dans celui des fontes blanches, elle occupait toute la gamme des températures de fusion. En examinant les valeurs de retrait par solidification, on constate que les fers facilement graphitisables (les fontes grises) manifestent un degré très faible ou nul de retrait par solidification (environ 0,1 pour cent en moyenne) tandis que les fontes blanches ou les fontes truitées subissent un retrait considérable (-2,1 pour cent en moyenne). En fait, c'est dans les échantillons de fonte blanche ou de fonte truitée qu'apparaissent principalement les retassures ou porosité de retassures, qui affaiblissent grandement le métal. La résistance à la traction des fontes grises, évaluée en fonction de la composition, varie entre 200 et 278 MPa; et la résistance à la compression, entre 726 et 923 MPa.

Comme on peut obtenir la même valeur d'équivalent en carbone avec des valeurs en carbone, en silicium et en phosphore différentes, les fontes ayant une valeur constante d'équivalent en carbone, mais des teneurs nettement différentes en carbone, en silicium et en phosphore ne manifesteront pas des propriétés similaires. En d'autres mots, la composition chimique ne suffit pas pour identifier un fer possédant des propriétés mécaniques spécifiques.

Tableau 3
Caractérisation des fontes regroupées en fonction de la période archéologique

Période	N° de code	Type de Fonte	Structure		Composition[a] (%)				Comportement en fonderie				Propriétés mécaniques		
			Graphite[b]	Phases[c]	Carbone Total	Carbone combiné	Mn	P	CE[d]	SC[e]	T°[f]	V%[g]	HB[h]	TS[i]	CS[j]
I	C1	Grise	VII A/B 4	P+G+S+(C)	3,5	0,3	0,5	0,2	3,7	0,8	1215	+0,8	140	—	—
	C2	Blanche	V	L+(P+G)	3,9	2,3	0,7	0,3	4,2	1,0	1150	-2,4	601	—	—
	C3	Grise	VII A/B 4	P+G+S+(C)	3,9	1,1	0,9	0,1	4,2	1,0	1150	+0,1	228	278	923
II	C4	Blanche	V/VI	L+(P+G)	4,0	3,1	0,1	0,6	4,4	1,0	1120	-3,8	502	—	—
	C5	Truitée	VII B 4	P+C+G+S	4,2	1,3	1,4	0,9	4,6	1,1	1080	+0,1	251	—	—
	C6	Blanche	aucun	L+(P+G)	4,5	2,7	0,9	0,2	4,7	1,1	1080	-2,0	590	—	—
III	C7	Blanche	VII	P+C+G+S	4,2	2,6	1,4	1,3	4,8	1,1	1050	-2,4	464	—	—
	C8	Truitée	VII B 4	P+C+G+S	3,8	2,0	1,5	1,3	4,5	1,0	1100	-2,0	378	—	—
	C9	Grise	VII A/B 4	P+G+S	3,8	0,7	0,9	0,6	4,2	1,0	1140	+0,5	187	200	726
IV	C10	Grise	VII A/B 3	P+G+S	3,8	1,3	0,1	0,7	4,3	1,0	1130	-0,5	195	236	825
	C11	Grise	VII A/B 3	P+G+S	3,7	1,1	0,1	0,7	4,2	1,0	1140	-0,3	185	267	911
	C12	Grise	VII A/B 4	P+G+S	3,9	0,9	1,0	0,7	4,3	1,0	1130	+0,4	199	258	886

Notes

[a] Gamme de composition des autres éléments: Si = 0,4 jusqu'à 0,8%, S = 0,02 jusqu'à 0,05%

[b] Forme, type et dimension du graphite conformément à la norme A 247 de l'ASTM.

[c] P, perlite; G, graphite; S, steadite; C, cémentite; L, lédeburite. Les parenthèses indiquent que le microconstituant se trouve en petite quantité.

[d] Équivalent en carbone, CE = %C + 1/3 x (%Si + %P)
Gray and Ductile Iron Castings... 1971 : 109

[e] Degré de saturation, SC = %C [4,3 - 1/3 x (%Si + %P)] *Gray and Ductile Iron Castings* ... 1971 : 110

[f] Température du liquidus (arrondie à 10 °C près),
T °C = 1669 - 124 x (%C + %P/2 + Si/4)
(Humphreys 1961 : 621)

[g] Retrait par solidification, V% = 2,0 (%C graph. - 2,80) Hamaker Wood et Rote 1952 : 410

[h] Indice de dureté Brinell HB 10/3000

[i] Force de traction en MPa (pour la fonte grise non inoculée coulée dans des moulages de forme simple), TS en psi = 10000 [b - 2 x (%C + %Si/3 + %P/4)]
b = 11,68 - 2,3 log (2 x épaisseur de la plaque en pouces)
(Schneidewind et McElwee 1950 : 319f.

[j] Résistance à la compression en MPa, de TS au graphique CS,
(Schneidewind et McElwee 1950 : 326)

Tableau 4
Caractérisation des fontes regroupées en fonction du type de fonte

Type de fonte	Objet	N° de code[a]	Structure	Composition[b] (%)				Comportement en fonderie				Propriétés mécaniques		
				Carbone total	Carbone combiné	Mn	P	CE	SC	T °C	V%	HB	TS (MPa)	CS (MPa)
Fontes grises	Plaques	C3, C9[c], C10, C11, C12	P+G+S	3,5	0,7	0,1	0,1	4,2	1,0	1130	-0,5	185	200	726
				3,9	1,3	1,0	0,7	4,3		1150	0,5	228	278	923
Fontes truitées	Rigoles	C5, C8	P+G+C+S	3,8	1,3	1,4	0,8	4,4	1,0	1080	-2,0	251	—	—
				4,2	2,0	1,5	1,3	4,6	1,1	1100	0,1	378		
Fontes blanches	Descentes de coulée	C2, C4, C6, C7	L+(P+G)[d]	3,9	2,3	0,1	0,2	4,2	1,0	1050	-3,8	464	—	—
				4,5	3,1	1,4	1,3	4,8	1,1	1150	-2,0	601		
Toutes les fontes				3,5	0,7	0,1	0,1	4,2	1,0	1050	-3,8	185	—	—
				4,5	3,1	1,5	1,3	4,8	1,1	1150	0,1	601		

Notes

Les deux chiffres fournis pour la composition, le comportement en fonderie et les propriétés mécaniques représentent la gamme des valeurs minimales et maximales correspondant à chaque type de fonte.

[a] La plaque C1 affectée par la chaleur n'est pas incluse dans le tableau.

[b] La gamme de composition des autres éléments est Si = 0,4 jusqu'à 0,8%, S = 0,02 à 0,05%.

[c] C9 est une descente de coulée.

[d] Les parenthèses indiquent que le microconstituant est en petite quantité.

Pour cette raison, on a déterminé des propriétés mécaniques, telles que la résistance à la traction et la résistance à la compression, qui ne sont pas directement liées à la composition des fontes, mais sont basées sur leurs valeurs de dureté.

La résistance à la traction en psi (TS) et l'indice de dureté Brinell (HB) de la fonte grise sont liées à l'équation $TS = 1{,}82 \times HB^{1{,}85}$, qui a été déterminée d'après d'une étude statistique fondée sur des données provenant de 1553 échantillons individuels (MacKenzie 1946 : 1027). Pour les fontes grises, dont les chiffres de dureté varient entre 185 et 228 HB, la résistance à la traction calculée approximativement varie entre 196 et 289 MPa. Une gamme analogue de valeurs (de 200 à 272 MPa) fut obtenue en recourant à la relation de Krause (1969 : 15).

On peut constater que la résistance à la traction des fontes grises provenant des Forges, évaluée en fonction de leur composition, est pratiquement équivalente à celle à laquelle on parvient en se fondant sur les chiffres de dureté. De manière comparable, la résistance moyenne à la compression basée à la fois sur la composition (Schneidewind et McElwee 1950 : 326) et sur la dureté (Donoho 1950 : 98) du matériau fut évaluée autour de 850 MPa.

Les fontes grises provenant des Forges possèdent une dureté et une résistance comparables à la fonte grise moderne de classe 25 ou 30, et constituent un matériau de haute qualité qui serait considéré de nos jours satisfaisant pour des applications techniques. Un tel matériau convenait parfaitement à la fabrication d'outils, de pièces de machinerie complexe et d'autres objets qui demandaient une résistance mécanique considérable, une bonne résistance à l'usure et à la chaleur ainsi qu'une très faible ductilité ou ténacité. La norme technique moderne ASTM A 319-53 classe I recommande la fabrication de pièces coulées de couleur grise dans une gamme de composition analogue à celle des Forges pour des usages à températures élevées. Les principales applications d'un tel matériau possédant une résistance thermique aux chocs consistent à en faire des pièces pour foyers, des barreaux de grille, des pièces de four, des creusets résistant aux produits caustiques et des creusets de fusion. Par exemple, la plaque C1, qui a subi les effets d'un usage à haute température, a peut-être été la plaque chauffante d'un fourneau. Les fontes grises à surface trempée très dure et résistante à l'usure (telles que les plaques C1, C3 et C12) conviennent bien à la fabrication de roues de wagons. Les fontes grises à faible teneur en phosphore sont suffisamment tenaces à l'état de pièces coulées pour être utilisées dans la fabrication de marteaux et d'enclumes.

Dans les fontes blanches, la grande partie du carbone se présente sous forme combinée en tant que carbure de fer. En raison de la forte proportion de ce composé dans la lédeburite, la phase prédominante, les fontes blanches sont dures et extrêmement fragiles. Ce genre de structure confère aux fontes blanches une résistance très grande à la compression et une résistance supérieure à l'usure ainsi que la propriété de conserver leur dureté jusqu'à une température légèrement supérieure au rouge cerise, soit 700 °C (*Gray and Ductile Iron Castings...* 1971 : 272). L'emploi d'un tel matériau a dû être limité à certaines applications spéciales exigeant une grande dureté, une excellente résistance à l'usure et une bonne résistance aux températures élevées, mais aucune résistance aux chocs, en raison de sa fragilité. Les fontes blanches, du fait qu'elles résistent mieux au gonflement que les fontes grises, ont pu être utilisées notamment en tant que plaques de fonte pour soles de fours d'affinage.

Les caractéristiques des matériaux sont résumées dans les tableaux 3 et 4, qui récapitulent la structure, la composition, les propriétés mécaniques et le comportement en fonderie des fontes regroupées en fonction de la période archéologique et du type de fonte. Même si l'on a pas examiné les pièces coulées elles-mêmes, mais les objets qui se présentent sous la forme de descentes de coulée, de canaux de coulée et de plaques, on ne prévoit pas, du point de vue de la caractérisation des produits, d'importantes différences entre la composition et la structure des articles examinés et les pièces effectivement coulées, en admettant que l'épaisseur du profil de ces dernières n'ait pas été importante.

Méthode de fabrication

La structure et la composition des fontes provenant des Forges nous renseignent sur leur méthode de fabrication. Les impuretés qu'elles contiennent ont habituellement leur origine dans le minerai, dans le combustible qui alimente le haut fourneau, et plus rarement, dans le fondant calcaire.

La faible teneur en soufre suggère que l'on a employé du charbon de bois comme combustible pour effectuer la réduction des fontes. Pendant la fusion, le phosphore est réduit et absorbé par le fer, mais une certaine proportion de cet élément peut être intégrée au laitier. Donc, la forte teneur en phosphore des fontes indique que des minerais de fer riches en phosphore ont servi à leur fabrication. Il n'est pas inhabituel de constater des taux élevés de phosphore et de manganèse lorsque les minerais utilisés sont de type limonite. Les sources que nous avons consultées (Griffin 1893 : 974f, 990) font incidemment état de l'emploi de limonites provenant de la région de Trois-Rivières pour fabriquer des roues de voiture par coulée en lingotière, des étuves et d'autres pièces coulées de haute qualité. On a constaté d'importantes variations des taux de phosphore et de manganèse dans certaines des fontes, ce qui indique que l'on a aussi employé des minerais de compositions différentes, et que peut-être, dans le haut fourneau, les conditions de fusion ont varié pour certaines des fontes. Le très fort taux de carbone présent dans les fontes s'expliquerait par les conditions régnant dans le haut fourneau, abondamment pourvu en carbone qui pouvait être mis en solution par le fer. Ceci indique qu'une forte proportion de charbon de bois a dû être utilisée durant l'opération de fusion du minerai.

La teneur en silicium dépend des conditions de production; les températures basses permettent de fabriquer des fontes pauvres en silicium. Aussi, les petites quantités de silicium que contiennent les fontes examinées indiquent qu'il y a eu un plafond thermique lors de l'opération de fusion. La plus faible hauteur et les températures plus basses de fonctionnement du haut fourneau à vent froid alimenté en fer limonitique contenant peu de

matériaux de gangue ont contribué à réduire l'absorption de silicium pendant la fusion. Par contre, la présence de quantités plus grandes de silicium est inévitable dans un haut fourneau moderne de grande taille qui reçoit du minerai provenant des mines. La réduction de la silice dans ce genre de four a lieu dans les étalages à des températures supérieures à 1500 °C.

En comparant les fontes examinées aux fers au charbon de bois des XVIII^{e} et XIX^{e} siècles provenant de divers pays, on constate que le taux de carbone présent dans les fontes provenant des Forges est considérablement plus élevés et leur teneurs en manganèse et en phosphore généralement supérieures aux taux observés dans les fontes européennes ou américaines (tableau 5). La concentration de silicium est semblable tandis que celle de soufre est habituellement faible. Tous des faits montrent clairement que les fontes provenant des Forges sont des fers au charbon de bois à vent froid, la plupart d'entre elles étant des fontes brutal fragiles à froid.

Dans un haut fourneau moderne, on emploie du coke ou du charbon au lieu du charbon de bois et, pour fabriquer des pièces coulées, on procède à la fusion de la fonte brute dans un cubilot ou un four à réverbère de façon à ajuster sa composition jusqu'au résultat final désiré. La composition de la fonte par un cubilot, en particulier sa teneur en carbone, n'atteint pas la limite supérieure de la composition de la fonte brute. La teneur en carbone des fontes provenant des Forges se situe à la limite supérieure des fontes modernes ou est plus élevée. Tout ceci laisse supposer que le fer en fusion était probablement amené de l'avant-creuset ouvert du haut fourneau dans une poche de coulée, d'où il était versé dans des moules préparées sur le plancher de la halle de coulée. La possibilité de fabriquer du métal liquide pouvant être coulé selon la forme finale requise était le principal avatange des anciens hauts fourneaux sur les bas foyers d'aujourd'hui.

Les limites supérieures pratiques de la température de coulée dépendent de la capacité du moule de résister à l'impact du métal en fusion. Cette limite se situe, dans les fonderies modernes, entre 1450 et 1500 °C environ (American Society for Metals [ci-après l'ASM] 1961-1976, 1 : 351). On peut soutenir, en se basant sur la structure des fontes grises, que la température de coulée du métal liquide était en fait très inférieure à 1400 °C. La structure primaire des fontes est fortement influencée par la température de coulé, est une surchauffe durant le cycle de la fusion entraînerait probablement une surfusion pendant la solidification. L'absence, dans la structure, de lamelles de graphite dont la formation est favorisée par la surfusion (types D et E) (*Gray and Ductile Iron Castings* ... 1971 : 119f), la granulométrie très faible des cellules eutectiques et la configuration idiomorphe dense que présentent les inclusions de sulfure de manganèse (Morrogh

Tableau 5
Composition des fontes au charbon de bois des XVIII[e] et XIX[e] siècles et des fontes modernes

	Grande-Bretagne					États-Unis		Europe centrale		Suède		Russie		Fonte modernes		
Réf.*	1	2	3	3	4	5	5	6	6	7	8	9	9	10	11	12
Lieu	Staffordshire Sud (moyenne de 4)	Nibthwaite	Duddon (truitée)	Little Aston	Maryport (moyenne de 4)	Hopewell, Ohio	Redding, Penns. (blanche)	Styria (blanche)	Joachimstahl (blanche)	Dannemora	Laxa	Woronez	Woronez	Grise (classe 20-60)	Blanche	Truitée
C	3,07	3,86	4,30	3,37	3,89	4,07	3,99	2,93	3,60	4,81	3,55	3,32	3,00	2,50–3,80	1,8–3,6	3,25–3,60
Si	1,19	0,85	0,65	0,28	0,60	0,68	0,37	0,307	0,66	0,18	1,25	1,88	0,98	1,20–2,60	0,5–1,9	0,50–0,65
Mn	0,74	0,05	0,10	0,91	0,10	0,11	0,12	0,724	0,531	1,99	0,19	0,30	0,26	0,45–0,80	0,25–0,80	0,40–0,60
P	0,38	0,11	0,124	1,01	0,13	0,147	0,067	0,021	0,52	0,12	0,08	0,65	0,51	0,05–0,80	0,06–0,18	0,30–0,45
S	0,04	0,029	0,023	0,081	0,033	0,016	0,016	0,018	0,021	trace	0,04	0,030	0,035	0,05–0,13	0,06–0,20	0,15

**Références*

1. Percy s.d. : 544
2. Morton 1969 : 10
3. Morton et Gould 1967 : 241
4. Tylecote *et al.* 1965 : 871
5. Henger 1970 : 47
6. Greenwood 1893 : 65
7. Percy s.d. : 536 (n° 1)
8. Keep 1902 : 11, 102
9. Eriksen et Thegel 1966 : 82 (Gun 104, 103)
10. ASM 1961–1976, 1 : 355
11. *Gray and Ductile Castings*... 1971 : 94
12. Heine, Loper, et Rosenthal 1967 : 494

1941b : 216) donnent à penser que les fontes grises provenant des Forges ont été coulées à une température voisine du liquidus, de près de 1200 °C. On s'attendrait à ce que la température de coulée des fontes blanches soit supérieure à celle des fontes grises. Cette hypothèse est confirmée par la présence dans les fontes blanches d'une zone columnaire prédominante, et aussi par l'équivalent en carbone plus élevé et la température plus haute du liquidus.

La composition et la dimension des objets nous livrent des indices importants du point de vue technologique. Les fontes grises et blanches se situent essentiellement dans la même gamme de composition, qui se caractérise par une teneur élevée en carbone, faible en silicium, et variable en manganèse et en phosphore. En général, l'épaisseur du profil des objets en fonte grise est inférieure à celle des objets de fonte blanche ou truitée tout en étant supérieure dans la plupart des fontes grises aux dimensions minimales du profil des pièces coulées, telles que recommandées par l'ASTM pour les fontes de classe 20 à 35. Le profil minimal qui peut être coulé en fonte grise exempte de cémentite libre à massive est de 3 à 9 millimètres (ASM 1961-1976, 1 : 353) tandis que l'épaisseur moyenne du profil des objets de fonte grise est d'environ 11 millimètres. Il s'ensuit que la structure, la dureté et le type de fonte tels que mis en évidence par l'examen métallurgique des objets ne s'expliquent pas essentiellement par la composition de ces objets mais résulte probablement du refroidissement rapide du métal liquide. On peut en conclure que différentes techniques de coulée ont été employées pour les objets en fonte grise et en fonte blanche avec différentes vitesses de refroidissement régies par le type de moule et la température du métal amené par coulée.

La présence prédominante de lamelles de graphite de type A et l'absence de graphite surfondu dans la matrice perlitique des fontes grises sont l'indice d'un refroidissement modéré, comme c'est le cas dans un moule en argile ou en sable. Également, la présence d'une fine structure cellulaire indique que la vitesse de refroidissement a été modérément rapide et que le profil des parois du moule était relativement petit. Le taux élevé de carbure et le faible taux de soufre ont fait en sorte que les fontes au charbon de bois se solidifient en tant que fontes grises malgré leur faible taux de silicium. Les objets en fonte blanche, par contre, ont probablement été fabriqués par coulée du métal en fusion dans une coquille de sorte que la vitesse de refroidissement était suffisante pour que l'on obtienne de la fonte blanche de l'épaisseur désirée. Plusieurs facteurs ont contribué à la surfusion des fontes blanches. La présence d'une zone columnaire prédominante dans ces fontes est l'indice d'une d'une température de coulée relativement élevée,

d'un refroidissement très rapide, d'un faible taux d'alliage et, peut-être, du fait que la partie supérieure de la coulée est restée en fusion à une température élevée.

Progrès technologiques réalisés à l'usine sidérurgique

L'examen métallurgique des objets en fonte n'a pas fourni d'indice qui mettrait en doute l'âge archéologique indiqué des échantillons. En fait, leur structure et leur composition confirment le mode de groupement des fontes. En comparant les résultats de la présente étude avec la chronologie relative des niveaux d'occupation, on constate que les fontes de la période I ont une teneur en phosphore relativement faible tandis que toutes les autres fontes appartenant aux périodes ultérieures, à l'exception de C6, ont une concentration de phosphore nettement plus élevée. Ceci pourrait indiquer qu'il y aurait eu, quelque part entre les périodes archéologiques I et II, une modification du type de minerai employé dans la fabrication des fontes, et que l'on est passé de minerais pauvres en phosphore à des minerais riches en cet élément. Les fontes provenant de la période I ont des structures qui varient d'un échantillon à l'autre. Cette variabilité serait peut-être l'indice d'un certain degré d'inaptitude à contrôler le procédé de fabrication.

Toutes les fontes provenant des périodes II et III, à l'exception de C9, sont blanches ou truitées, la plupart ayant une teneur très forte en carbone total. Au cours de ces deux périodes, on a probablement employé une forte quantité de combustible lors du traitement du minerai dans le haut fourneau. La dernière période (IV) se distingue des autres par la présence de plaques de fonte grise phosphoreuse de structure et de composition uniformes. Durant la transition entre les périodes III et IV, on a modifié la technique de coulée, remplaçant les coquilles par des moules en sable. Selon Doat et Evrard (1951 : 60), cette évolution dans le temps quant au type de fontes fabriquées se remarque également chez les fondeurs français, belges et luxembourgeois. Les fondeurs coulaient des pièces de fonte blanche aux XIV^{e} et XV^{e} siècles, de fonte truitée aux XVI^{e} et XVII^{e} siècles, et de fonte grise à la fin du XVII^{e} et pendant tout le XVIII^{e} siècle. En ce qui concerne

les autres éléments présents dans les fontes, on ne constate aucune cohérence dans les importantes variations des taux de manganèse, seuls le faible taux de silicium et la très faible teneur en soufre restent essentiellement les mêmes pendant toutes les périodes archéologiques.

En général, on ne peut déterminer la date de fabrication d'un objet métallurgique d'après sa seule structure ou composition chimique. Cependant, si son lieu d'origine est connu, on peut estimer en gros la date de fabrication en comparant les résultats d'un examen de la pièce aux résultats de l'étude d'une série d'objets d'âge connu provenant d'un lieu donné. Aucun examen métallurgique approfondi n'avait auparavant été entrepris sur les fontes trouvées aux installations sidérurgiques des Forges et, de ce fait, nous ne disposions d'aucune base utile pour comparer nos résultats avec d'autres données.

Nous avons tenté, en n'y réussissant que partiellement, de dater les fontes en établissant un rapport entre la méthode de fabrication (y inclus le comportement en fonderie, les conditions de coulée et de fusion déterminées au moyen d'un examen métallurgique) et les progrès technologiques réalisés à l'usine sidérurgique (connus grâce aux sources historiques et archéologiques). Ce succès partiel pourrait s'expliquer par le manque de données sur l'évolution technologique du site, ou par le fait que cette évolution technologique n'ait pas été assez marquée pour justifier l'adoption d'une telle méthode.

On peut considérer cette étude comme une base solide pour poursuivre les recherches sur les objets trouvés aux Forges. Son utilité aux fins de comparaison avec d'autres données est limitée du fait que l'examen fut réalisé sur un nombre relativement restreint d'objets en fonte fabriqués au cours d'une période s'échelonnant sur 150 ans. Des séries statistiques chronologiques d'analyses métallurgiques ainsi que les données fournies par les sources historiques et les recherches archéologiques permettront de se faire une idée complète de l'évolution technologique du site. Il est à souhaiter que des recherches prochaines sur le matériel archéologique provenant des Forges du Saint-Maurice soient entreprises, et qu'elles s'étendent aux objets finis, aux scories, au minerai et au garnissage des fours.

Glossaire de termes métallurgiques

Pour de plus amples informations sur les termes techniques, consulter le *Dictionary of Physical Metallurgy : English, German, French, Polish, Russian (1977)* d'Eugeniusz Tyrkiel.

Affinage Deuxième étape de la méthode indirecte de fabrication du fer forgé dans laquelle la fonte brute fabriquée dans un haut fourneau est convertie en fer forgé dans une forge. Les impuretés présentes en excès (carbone, silicium, manganèse, phosphore) sont éliminées pendant le traitement de la fonte brute dans le four d'affinage, puis la fonte purifiée est forgée dans un four à réchauffer pour assurer la suppression du laitier et la consolidation du métal.

Anisotropie Ici, caractéristique d'une phase ou inclusion ayant des propriétés optiques qui varient en fonction de la direction dans laquelle la lumière est diffusée.

Attaque à l'acide Procédé permettant de mettre en évidence des détails de la structure par attaque préférentielle d'une surface métallique fortement polie avec des réactifs.

Austénite Solution solide riche en fer, contenant du carbone, et cristallisant dans le système cubique à faces centrées.

Canal ou rigole 1) Canal horizontal au sein duquel coule le métal en fusion pour se déverser dans un moule. Il relie la descente de coulée au pied de coulée. 2) Pièce de rebut métallique moulée dans une telle ouverture.

Carbone combiné Partie du carbone total de la fonte, qui est combinée chimiquement avec d'autres éléments, et qui ne se trouve donc pas à l'état libre en tant que carbone graphitique. En additionnant le carbone graphitique au carbone combiné, on obtient la teneur en carbone total.

Cémentite (carbure de fer) Composé de fer et de carbone très dur et cassant, Fe_3C.

Charbon de bois Bois ayant subi une distillation qui n'a laissé que du carbone, et que l'on utilisait autrefois comme combustible dans les installations sidérurgiques.

Constituant Phase ou combinaison de phases montrant une configuration caractéristique dans une microstructure d'alliage.

Coulabilité Combinaison complexe de propriétés d'un métal liquide et de ses caractéristiques de solidification, permettant une coulée finale de bonne qualité.

Cristal Solide homogène de structure géométrique régulière, caractéristique de l'élément, dans laquelle les atomes sont disposés selon un mode caractéristique.

Cristal idiomorphe Cristal aux contours définis.

Cristaux primaires Premier type de cristaux qui se séparent du mélange pendant le refroidissement.

Cubilot Petit four alimenté au coke et qui sert à effectuer la fusion de la fonte brute en vue de la coulée.

Dendrites Cristaux formés durant la solidification, caractérisés par des formes arborescentes.

Descente de coulée 1) Canal vertical qui part de la surface supérieure du moule et qui relie le bassin de coulée au canal horizontal (rigole) acheminant le métal en fusion vers le pied de coulée. 2) Pièce de rebut métallique, moulée dans une telle ouverture.

Ductilité Degré de déformation plastique que peut supporter un matériau sans se casser.

Dureté Résistance d'un matériau à la déformation, habituellement mesurée par un essai de résistance à la pénétration.

Équivalent en carbone Taux de carbone total, de silicium et de phosphore d'une fonte qui se combinent en un seul facteur pour influencer la composition eutectique, et que l'on exprime sous forme d'une relation empirique.

Étalage Zone de combustion d'un haut fourneau. Il s'agit de la partie inférieure de la cuve d'un four juste au-dessus du foyer, là où l'inclinaison des parois commence.

Eutectique Transformation de phase dans laquelle toute la phase liquide, en se refroidissant, se transforme simultanément en deux phases.

Eutectoïde Transformation de phase dans laquelle une phase solide, en se refroidissant, se transforme simultanément en deux phases solides différentes.

Eutectique Divorcé Structure dans laquelle les composants d'un eutectique semblent être entièrement séparés.

Eutectique phosphuré Voir **Stéadite**

Fer forgé Forme de fer pur façonné mécaniquement, et contenant des filonnets de laitier ou scories.

Ferrite Solution solide de carbone dans du fer avec une structure cristalline cubique centrée. Il s'agit de fer presque pur, contenant moins de 0,05 pour cent de carbone.

Fluidité Capacité d'un métal liquide de s'écouler facilement, de se déverser dans le creux d'un moule et de le remplir.

Flux ou fondant Matériau, semblable à la chaux, ajouté au cours d'une opération de fabrication du fer, qui s'unit aux impuretés afin de permettre au laitier de s'écouler facilement.

Fonte Famille de pièces coulées se composant d'alliages ferreux non malléables à forte teneur en carbone (habituellement entre 1,7 et 4,5 pour cent) et à teneur très élevée en silicium (0,5 à 2,6 pour cent).

Fonte blanche Fonte dans laquelle tout ou pratiquement tout le carbone se trouve sous forme combinée.

Fonte brute, fonte de première fusion Produit brut d'un haut fourneau, que l'on verse en fusion dans un lit de coulée. Il se solidifie dans des canaux latéraux appelés gueuses-mères, qui se ramifient en des canaux plus petits appelés gueuses.

Fonte grise Fonte contenant un pourcentage relativement élevé de carbone présent sous la forme de graphite lamellaire.

Fonte truitée Mélange de fonte grise et de fonte blanche en proportions variables.

Four d'affinage Four au charbon de bois utilisé pour purifier la fonte brute afin d'obtenir du fer forgé selon le procédé indirect.

Fragile à froid État de fragilité aux températures plus basses que la température de recristallisation du métal.

Fusion Opération métallurgique au cours de laquelle le minerai est réduit et le métal que l'on cherche à obtenir est séparé du minerai à l'état fondu, de la gangue et des impuretés avec lesquelles le minerai est peut-être chimiquement combiné ou physiquement mélangé.

Gangue Matière minérale n'ayant aucune valeur commerciale combinée dans un minerai à des minéraux métalliques de grande valeur.

Gonflement de la fonte Augmentation permanente du volume d'une pièce de fonte résultant de chauffages répétés ou prolongés à des températures élevées.

Grains Cristaux présents dans les métaux ou alliages.

Granulométrie Dimension moyenne des cristaux ou grains présents dans un métal.

Graphite Carbone non combiné présent dans les fontes.

Graphitisation Formation de graphite résultant de la décomposition de la cémentite pendant le chauffage de la fonte.

Graphite lamellaire Carbone graphitique se présentant sous la forme de plaquettes que l'on rencontre dans la microstructure des fontes grises.

Gueulard Partie la plus étroite de la cuve d'un four, à la partie supérieure d'un haut fourneau. C'est par là que les matériaux sont chargés dans le four.

Haut fourneau Four à cube de fusion alimenté par un courant d'air et destiné au traitement du minerai en vue de l'obtention de fontes liquides.

Hypereutectique Composition à droite du point de transformation eutectique dans un diagramme de phase binaire.

Hypoeutectique Composition à gauche du point de transformation eutectique dans un diagramme de phase binaire.

Inclusions non métalliques Particules d'impuretés (habituellement des silicates, des sulfures, des oxydes, etc.) retenues mécaniquement, ou formées durant la solidification, ou formées par une réaction ultérieure avec le métal solide.

Interdendritique Situé entre les rameaux d'une dendrite ou entre les limites de plusieurs dendrites.

Laitier, scories Rebut non métallique formé pendant la fusion du fer, et qui résulte de l'action exercée par le flux sur les constituants oxydés non métalliques des métaux en fusion.

Laminoir à blooms Four primitif permettant de produire du fer forgé directement à partir du minerai.

Lédeburite Mélange eutectique intime d'austénite et de cémentite formé pendant le refroidissement rapide des fontes.

Liquidus Dans un diagramme d'équilibre, ligne supérieure qui représente le lieu des températures auxquelles chaque alliage commence à se solidier (au moment du refroidissement) ou cesse de fondre (au moment du chauffage).

Macrostructure Structure des métaux, telle qu'indiquée par un examen à l'oeil nu ou à un faible grossissement (jusqu'à dix diamètres) d'une éprouvette meulée ou polie (et parfois attaquée à l'acide).

Matrice Principal constituant, de caractère continu, de la microstructure dans lequel les autres constituants ou phases sont enrobés ou contenus.

Microconstituant Voir **Phase** et **Constituant**

Microdureté Dureté des microconstituants d'un matériau.

Microstructure Structure d'une éprouvette convenablement préparée, telle qu'indiquée à un grossissement supérieur à dix diamètres.

Minerai Gîte minéral naturel à partir duquel peut être extrait avec profit un élément métallique.

Moulage en coquille Pièce coulée qui s'est refroidie très rapidement, et possède donc une surface très dure et un noyau mou et tenace.

Moule Forme, faite de sable, de métal ou d'un matériau réfractaire, contenant la cavité dans laquelle on coule le métal en fusion pour obtenir une pièce coulée de la forme désirée.

Perlite Mélange lamellaire de ferrite et de cémentite résultant de la décomposition eutectoïde de l'austénite dans les alliages ferreux, et contenant environ 0,8 pour cent de carbone.

Phase Constituant complètement homogène à la fois physiquement et chimiquement. Il est séparé du reste de l'alliage par une surface continue appelée interface.

Pléochroïsme Propriété de certaines substances optiquement anisotropes — lorsqu'on les examine en lumière polarisée dans un plan — selon laquelle la couleur et l'absorption de la lumière dépendent de l'orientation du plan de polarisation de la lumière incidente par rapport au cristal.

Porosité Cavités dans un métal, qui ne sont pas nécessairement reliées entre elles, et ayant pour origine la rétention de gaz dans le métal en fusion ou partiellement fondu durant la solidification.

Procédé direct Procédé de réduction en une étape dans lequel la fusion du fer s'effectue directement à partir du minerai. De la fusion par laminoir à blooms, il résulte la production d'une éponge de fer pâteuse mélangée à du laitier.

Procédé indirect Procédé de fabrication du fer en deux étapes dans lequel on fabrique de la fonte brute liquide par fusion du minerai, puis on purifie cette fonte brute, par affinage, en fer forgé.

Procédé wallon Version à deux foyers du procédé d'affinage employé en Belgique, au Luxembourg, en France et en Grande-Bretagne. La conversion de la fonte brute en fer forgé était réalisée dans un four d'affinage alimenté au charbon de bois. Le réchauffement en vue du forgeage était effectué dans le four à réchauffer, qui pouvait être alimenté au charbon.

Recuit Procédé selon lequel on porte le métal à une température constante appropriée (600-1000 °C) avant de le laisser refroidir à la vitesse appropriée (généralement lente) et ce, en vue notamment d'adoucir un métal durci par façonnage à froid, d'obtenir la microstructure requise ou les propriétés mécaniques recherchées.

Résistance à la compression Charge maximum que peut supporter par unité de surface un matériau fragile sans se casser, lorsqu'il est soumis à une compression.

Résistance à la traction Charge maximale normale par unité de surface que peut supporter un matériau avant de se casser, lorsqu'il est soumis à une traction.

Retassure Cavité résiduelle dans des pièces coulées, résultant de la contraction ou du retrait par solidification.

Retrait ou contraction par solidification Diminution de volume accompagnant la solidification d'un métal en fusion.

Sole ou foyer Partie inférieure ou partie exploitée d'un four de fusion. Elle contient le métal chauffé ou en fusion.

Solution solide Phase cristalline dans laquelle un nombre variable d'atomes appartenant à deux métaux peuvent être distribués de façon aléatoire dans un type de réseau spatial. Dans une solution solide, les deux métaux ne sont pas combinés chimiquement, mais existent dissolus l'un dans l'autre sur une gamme de composition.

Sphéroïdite (perlite sphéroïdisée) Microstructure dans laquelle le carbure de fer se présente sous forme de petites sphères dans une matrice sphéritique.

Stéadite Microconstituant dur, riche en phosphore, que l'on rencontre dans la fonte; euctectique ternaire composé d'austénite, de cémentite et de phosphure de fer, ou eutectique binaire de ferrite et de phosphure de fer.

Structure Dimension, forme et disposition des phases.

Structure columnaire Structure grossière de colonnes parallèles de grains, chacune ayant son grand axe perpendiculaire à la surface de la pièce coulée.

Surchauffe Élévation de la température du métal en fusion au-dessus de la température normale de fusion.

Surfusion Diminution de la température au-dessous du niveau auquel survient habituellement une modification des phases en équilibre, sans que se produise en fait la transformation.

Température (de transformation) critique Température à laquelle se produit un changement de phase, de structure du cristal ou des propriétés physiques lorsqu'un métal ou un alliage est réchauffé ou refroidi.

Ténacité Capacité d'un matériau d'absorber de l'énergie sans subir de rupture.

Trempe 1) Pièce métallique rapportée, insérée dans la face d'un moule ou d'un noyau de sable, ou placé dans le creux d'un moule, en vue d'augmenter la vitesse de refroidissement à cet endroit. 2) Structure composée de fonte blanche produite dans les pièces coulées ferreuses par solidification rapide en raison, par exemple, de l'utilisation d'une trempe.

Tuyère Ouverture par laquelle est introduit l'air dans un haut fourneau.

Vent chaud Air de soufflage réchauffé dans une étuve à vent chaud, et introduit dans un haut fourneau, pour permettre de maintenir la combustion au même niveau tout en diminuant la consommation de combustible et en assurant un meilleur rendement de la production que l'étuve à vent froid.

Vent froid Air qui n'a pas été réchauffé et qui alimente sous pression un haut fourneau.

Bibliographie

American Society for Metals
1961-1976
Metals Handbook, 8e éd., Metals Park, Ohio, 11 vol., vol. 1 [1961] : Properties and Selection of Metals.

Bailey, Alan R., et Leonard E. Samuels
1971
Foundry Metallography, Betchworth, Angl., Metallurgical Services, Annotated Metallographic Specimens : Special Series — Studies in Technology.

Beaudet, Pierre
1983
« The Saint-Maurice Ironworks, Canada », *Historical Metallurgy*, vol. 17, n° 1 (janv.), p. 39-41, East Haney, Angleterre.

Bérubé, André
1983
« Technological Changes at Les Forges du Saint-Maurice, Quebec, 1729-1883 », *CIM Bulletin/Bulletin ICM*, vol. 76, n° 853 (mai), p. 75-80, Montréal.

Cox, Richard
1977
« Les forges du Saint-Maurice », *Research Bulletin/Bulletin de recherches*, n° 51, Parcs Canada, Ottawa.

Doat, Robert et René Evrard
1951
« Three Centuries of Cast Iron Metallurgy », *American Foundryman*, vol. 20, n° 2 (août), p. 58-60, Des Plaines, Illinois.

Donoho, C.K.
1950
« Mechanical Testing and Properties of Gray Iron », *Foundry*, vol. 78, n° 6 (juin), p. 96-99, 218-219, Cleveland, Ohio.

Eriksen, Egon et Svend Thegel
1966
Conservation of Iron Recovered from the Sea, Nordlunde, Copenhague, Tøjhusmuseets Skrifter 8.

Gale, W.K.V.
1967
The British Iron and Steel Industry : A Technical History, Newton Abbot, Angleterre, David et Charles.

Gray and Ductile Iron Castings Handbook : Including Data on Gray, Ductile, White and High Alloy Irons
1971
Charles F. Walton, dir., Cleveland, Ohio, Gray and Ductile Iron Founders' Society.

Greenwood, William Henry
1893
Steel and Iron, Comprising the Practice and Theory of the Several Methods Pursued in their Manufacture..., 6e éd., Londres, Cassel & Company.

Griffin, P.H.
1893
« The Manufacture of Charcoal-Iron from the Bog- and Lake-Ores of Three Rivers District, Province of Quebec, Canada », *Transactions of the American Institute of Mining Engineers*, vol. 21, p. 974-992, Philadelphie.

Hamaker, John C. fils, William P. Wood et Franklin B. Rote
1952
« Internal Porosity in Grey Iron Castings », *Transactions of the American Foundrymen's Society*, vol. 60, p. 401-427, Chicago.

Harrington, B.J.
1874
« Notes on the Iron Ores of Canada and Their Development in Canada », Geological Survey of Canada, *Report of Progress for 1873-1874*, Montréal, Dawson Brothers, p. 192-259.

Heine, Richard W., Carl R. Loper fils et Philip C. Rosenthal
1967
Principles of Metal Casting, New York, McGraw-Hill.

Henger, G.W.
1970
« The Metallography and Chemical Analysis of Iron-Base Samples Dating from Antiquity to Modern Times », *Bulletin of the Historical Metallurgical Society*, vol. 4, n° 2, p. 45-52.

Humphreys, J.G.
1961
« Effect of Composition on the Liquidus and Eutectic Temperatures and on the Eutectic Point of Cast Irons », *British Cast Iron Research Association Journal*, vol. 9, n° 5 (sept.), p. 609-621, Birmingham, Angleterre.

Keep, William J.
1902
Cast Iron : A Record of Original Research, New York, J. Wiley and Sons.

Krause, D.E.
1969
« Gray Iron — A Unique Engineering Material », *ASTM Special Technical Publication*, n° 455, p. 3-28, Philadelphie.

McGain, Alison
1977
« Travaux d'hiver aux Forges du St-Maurice, 1977 », *Research Bulletin/Bulletin de recherches*, n° 68, Parcs Canada, Ottawa.

MacKenzie, J.T.
1946
« The Brinell Hardness of Gray Cast Iron and Its Relation to Some Other Properties », *Proceedings — American Society for Testing Materials*, vol. 46, p. 1025-1035, Philadelphie.

Miller, Harry
1968
Canada's Historic First Iron Castings, Ottawa, Imprimeur de la Reine, ministère de l'Énergie, Mines et Ressources, Bulletin d'information IC 209.

Morrogh, H.
1941a
« The Polishing of Cast-Iron Specimens and the Metallography of Graphite Flakes », *Journal of the Iron and Steel Institute*, vol. 143, n° 1 (août), p. 195-205, Londres.
1941b
« The Metallography of Inclusions in Cast Irons and Pig Irons », *Journal of the Iron and Steel Institute*, vol. 143, n° 1 (août), p. 207-253, Londres.

Morton, George R.
1969
« Technical Aspects of the Early Iron Industry of Furness and District », *Bulletin of the Historical Metallurgical Society*, vol. 3, n° 1, p. 6-11, Angleterre.

Nadon, Pierre
1977
« Recherches archéologiques aux Forges de Saint-Maurice (1973-1976) », *Research Bulletin/Bulletin de recherches*, n° 44, Parcs Canada, Ottawa.

Percy, John
S.d.
Metallurgy, fac-similé des éditions de 1861-1880 en 4 vol., vol. 2 [1864] : « Iron, Steel », Eindhoven, Pays-Bas, De Archaelogische Pers Nederland.

Rogers, Bruce A.
1965
The Nature of Metals, édition livre de poche, Cambridge, Mass., MIT Press.

Samuels, Leonard E.
1980
Optical Microscopy of Carbon Steels, Metals Park, Ohio, American Society for Metals.

Schneidewind, Richard et R.G. McElwee
1950
« Part I : Composition and Properties of Gray Iron; Part II : Correlation of Properties of Gray Irons », *Transactions of the American Foundrymen's Society*, vol. 58, p. 312-332, Chicago.

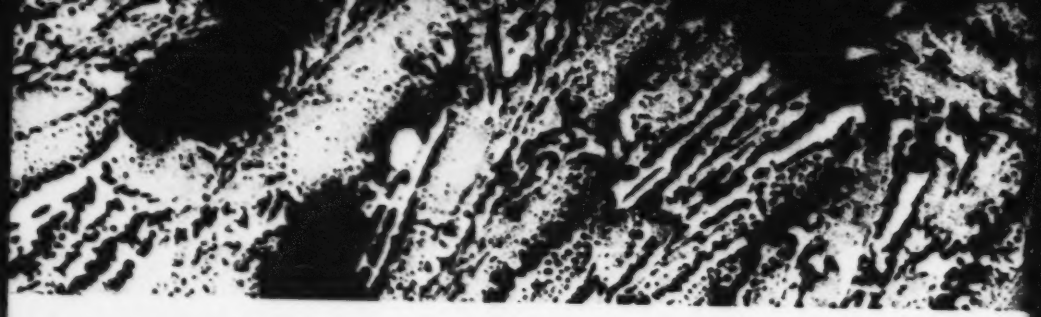
Swank, James M.
S.d.
History of the Manufacture of Iron in All Ages and Particularly in the United States from Colonial Times to 1891..., fac-similé de l'édition de 1892, New York, Burt Franklin, coll. American Classics of History and Social Sciences 6.

Trottier, Louise
1980
« Les Forges du Saint-Maurice : Their Historiography », *History and Archaeology*, n° 42, Ottawa. [Publié en français sous le titre : *Les Forges : historiographie des Forges du Saint-Maurice*, Montréal, Boréal Express, coll. Mékinac 6.]

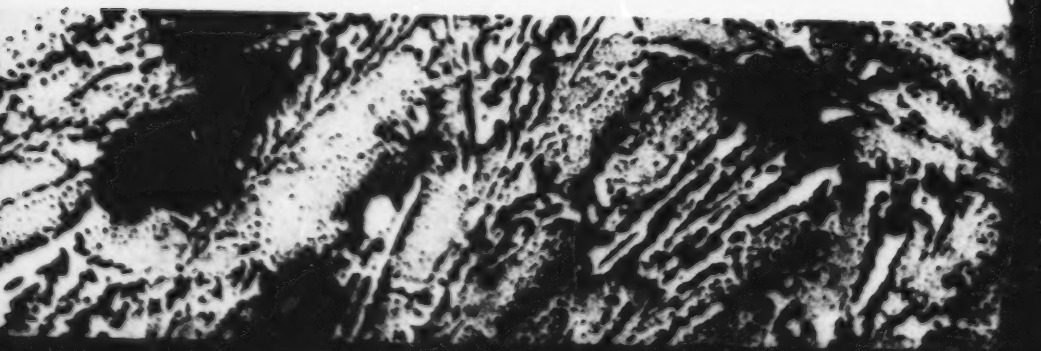
Tylecote, Ronald F., A.P. Banks, D.R. Wattleworth, et B.G. Ashmore
1965
« Maryport Blast Furnace : Post Mortem and Reconstruction », *Journal of the Iron and Steel Institute*, vol. 203, n° 9 (sept.), p. 867-874, Londres.

Tyrkiel, Eugeniusz
1977
Dictionary of Physical Metallurgy : English, German, French, Polish, Russian, Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing.

Unglik, Henry
1987
« Metallurgical Investigations of Cast Irons from Les Forges du Saint-Maurice Ironworks, Quebec, Canada », *Historical Metallurgy*, vol. 21, n° 1 (janv.), p. 1-7, East Haney, Angleterre.



L'examen métallurgique des 12 objets trouvés lors des fouilles effectuées aux premières installations sidérurgiques du Canada, les Forges du Saint-Maurice, a permis d'établir qu'il s'agissait de fontes grises, blanches et truitées.

Ces fontes furent fabriquées dans un haut fourneau alimenté au charbon de bois fonctionnant à des températures basses. Il s'agit de fers à vent froid au bois. Les différences de structure, de composition et de procédé technique d'une fonte à l'autre sont liées aux quatre périodes d'occupation des Forges: I, 1667–1760; II, 1760–1800; III, 1800–1850; et IV, 1850–1883. Les fontes provenant de la période I possèdent des structures, qui varient d'un échantillon à l'autre. À part une exception, les fontes provenant des périodes II et III sont blanches ou truitées. Au cours des périodes I ou II, il y a eu un changement du point de vue du type de minerai utilisé, et l'on est passé d'un minerai de faible teneur en phosphore à un minerai riche en phosphore. Durant la transition entre les périodes III et IV, on a modifié la technique de coulée, les coquilles étant remplacées par des moules de sable. La période IV se caractérise par des plaques de fonte grise phosphoreuse de structure et de composition uniformes.

Canada